



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS EN UN SISTEMA DE RESPALDO
MEDIANTE UPS, SU IMPACTO HACIA LA SUBESTACIÓN Y HACIA LA CARGA**

Edgar José Roberto Maldonado Muñoz

Asesorado por el Ing. Francisco González

Guatemala, enero de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS EN UN SISTEMA DE RESPALDO
MEDIANTE UPS, SU IMPACTO HACIA LA SUBESTACIÓN Y HACIA LA CARGA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDGAR JOSÉ ROBERTO MALDONADO MUÑOZ
ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO GONZALEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ENERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Jurgén Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympos Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Armando Cortez Chanchavac
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS EN UN SISTEMA DE RESPALDO MEDIANTE UPS, SU IMPACTO HACIA LA SUBESTACIÓN Y HACIA LA CARGA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 10 de noviembre de 2011.

Edgar José Roberto Maldonado Muñoz

Guatemala, 27 de abril de 2016

Ingeniero
Gustavo Orozco
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Orozco:

Por medio de la presente me dirijo a su persona para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado: **CARACTERIZACION DE LOS ARMONICOS EN UN SISTEMA DE RESPALDO MEDIANTE UPS, SU IMPACTO HACIA LA SUBESTACION Y HACIA LA CARGA**, que desarrolló el estudiante: **Edgar José Roberto Maldonado Muñoz**, el cual a mi criterio cumple con los objetivos propuestos, por lo que doy aprobación al mismo.

Sin otro particular y agradeciendo su atención, quedo de usted.

Atentamente,



Ing. Francisco Javier González López
Colegiado No. 2364



Ref. EIME 54. 2016.

Guatemala, 30 de AGOSTO 2016.

**Señor Director
Ing. Francisco Javier González López
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.**

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS EN UN SISTEMA
DE RESPALDO MEDIANTE UPS, SU IMPACTO HACIA LA
SUBESTACIÓN Y HACIA LA CARGA, del estudiante Edgar
José Roberto Maldonado Muñoz, que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

**Atentamente,
ID Y ENSEÑADA TODOS**

**Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
Coordinador Área Potencia**



SRO



REF. EIME 54. 2016.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; EDGAR JOSÉ ROBERTO MALDONADO MUÑOZ, titulado: CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS EN UN SISTEMA DE RESPALDO MEDIANTE UPS, SU IMPACTO HACIA LA SUBESTACIÓN Y HACIA LA CARGA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 6 DE SEPTIEMBRE 2016.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS EN UN SISTEMA DE RESPALDO MEDIANTE UPS, SU IMPACTO HACIA LA SUBESTACIÓN Y HACIA LA CARGA**, presentado por el estudiante universitario **Edgar José Roberto Maldonado Muñoz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, enero de 2017

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por haber sido guía en mi vida.

Mis padres

Por todo el amor, enseñanza y guía para mi superación.

Mi esposa

Por ser el apoyo incondicional, su amor y entrega.

Mis hijas

Por ser el motor de mi vida.

Mis suegros

Por su amor y cariño.

Todos mis amigos

Porque todos han aportado experiencias en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por su guía, su amor y la oportunidad que me brindó de ser un profesional.
Mis padres	Por su ejemplo de perseverancia, la confianza y su apoyo incondicional.
Mis hermanos	Por creer y apoyarme durante todo el proceso de mi carrera.
Mi esposa	Por su incondicional apoyo y amor.
Mis hijas	Por ser la razón que me empuja a ser mejor y salir adelante.
Mi alma mater	Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería por haberme dado la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SIMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVIII
1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1. Sistema ininterrumpible de UPS.....	1
1.2. UPS según su tecnología	1
1.2.1. UPS pasivo <i>stand-by</i>	2
1.2.2. UPS línea interactiva	2
1.2.3. UPS <i>online</i>	3
1.3. Diagrama interno del UPS	4
1.3.1. Rectificador.....	5
1.3.2. Inversor.....	7
1.3.3. Baterías	8
1.3.3.1. Tipos de baterías	9
1.3.3.2. Baterías secundarias	9
1.3.3.3. Baterías de celdas múltiples	10
1.3.4. <i>By-pass</i>	11
1.3.5. Transformador	13
1.3.6. Filtros.....	13
2. ARMÓNICOS	15

2.1.	Calidad de energía	15
2.1.1.	Definición de armónicos	15
2.1.2.	Calidad de la potencia.....	16
2.2.	Distorsiones de la forma de onda.....	17
2.2.1.	Variación de voltaje continuo.....	17
2.2.2.	Armónicos	18
2.2.3.	Interarmónica	18
2.2.4.	<i>Notching</i>	19
2.2.5.	Ruido.....	20
2.2.6.	Fluctuaciones de voltaje	20
2.3.	Armónicos	21
2.4.	Medidas de distorsión	23
2.5.	Potencia armónica y fundamental	25
2.6.	Secuencias.....	28
2.7.	Fuentes de armónicas.....	29
2.8.	Reducción de armónicas.....	29
2.9.	Normas.....	30
2.10.	Límites de distorsión de voltaje	30
2.11.	Límites de distorsión de corriente.....	31
3.	ESTUDIO ELÉCTRICO PARA DETERMINAR PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL UPS	33
3.1.	Definición de estudio eléctrico.....	33
3.2.	Equipo a utilizarse en el estudio.....	33
3.3.	Variables a registrarse y tiempo de muestreo	34
3.4.	Resultados	34
3.5.	Interpretación de resultados.....	48
3.5.1.	Voltaje	48
3.5.2.	Corriente.....	49

3.5.3.	Desequilibrio	49
3.5.4.	Parpadeo	50
3.5.5.	Frecuencia.....	51
3.5.6.	Porcentaje de distorsion armónica de voltaje	51
3.5.7.	Porcentaje de distorsión armónica de corriente.....	52
4.	EFFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN LA SUBESTACIÓN Y LA CARGA.....	53
4.1.	Efectos generales	53
4.2.	Impacto en la vida de los equipos.....	54
4.3.	Efecto en los transformadores	54
4.4.	Efecto en la carga.....	59
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de bloques UPS <i>stand-by</i>	2
2.	Diagrama de bloques UPS línea interactiva	3
3.	Diagrama de bloques UPS <i>online</i>	4
4.	Diagrama interno del UPS	5
5.	Diagrama del <i>by-pass</i>	12
6.	Distorsión de onda DC <i>offset</i>	18
7.	<i>Notching</i> o hendiduras de tensión	20
8.	Fluctuaciones de voltaje	21
9.	Forma de onda de corriente y espectro de armónica	22
10.	Triángulo de potencias	26
11.	Pirámide de potencias	27
12.	Diagramas de tensión	35
13.	Diagramas de intensidad	37
14.	Diagramas de desequilibrio de tensión	38
15.	Diagramas de <i>flicker</i> (PLT)	39
16.	Diagrama de fase A del armónico – tensión	40
17.	Diagrama de fase A del armónico – intensidad	41
18.	Diagrama de fase B del armónico – tensión	42
19.	Diagrama de fase B del armónico – intensidad	43
20.	Diagrama de fase C del armónico – tensión	44
21.	Diagrama de fase C del armónico	45
22.	Diagrama de fase D del armónico – tensión	46
23.	Diagrama de fase D del armónico – intensidad	47

24.	Diagramas de actividad de transitorios de tensión.....	48
-----	--------------------------------------------------------	----

TABLAS

I.	Límites de distorsión de voltaje para sistemas de distribución de 120V hasta 69 000V	31
II.	Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución de 120V hasta 69 000V	32
III.	Valores comerciales de transformadores con factor K.....	59

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Alfa
Cd	Cofactor de distorsión
I	Corriente
THD	Distorsión armónica total
TDD	Distorsión de demanda total
φ	Fi
∞	Infinito
%	Porcentaje
P	Potencia activa
S	Potencia aparente
Q	Potencia reactiva
s	Segundos
δ	Sigma
Σ	Sumatoria
I_{rms}	Valor eficaz de corriente
V_{rms}	Valor eficaz de voltaje
V	Voltaje

GLOSARIO

AC	<i>Alternating current</i> , corriente alterna.
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> .Entidad encargada de supervisar el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en los Estados Unidos.
Amperio	Unidad de la medida de la corriente eléctrica.
Aislador eléctrico	Son materiales que presentan gran resistencia evitando el flujo de corriente eléctrica de un punto a otro.
Ca	Corriente alterna.
Cc	Corriente continua.
Ciclo convertidor	Convertidor es un variador de frecuencia que funciona con conmutación natural. Dado el valor y la frecuencia de las tensiones de entrada, permite cambiar de forma continua el valor y la frecuencia de las tensiones de salida
Conmutador	Dispositivo para cambiar la dirección o interrumpir el paso de una corriente eléctrica en un circuito.

DC	<i>Direct current</i> , corriente directa.
Electrodos	Un electrodo es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito.
Electromagnetismo	El electromagnetismo describe los fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento, usando para ello campos eléctricos y magnéticos y sus efectos sobre las sustancias sólidas, líquidas y gaseosas.
Ferromagnético	Propiedad de algunos materiales que hace que resulten imantados cuando se sitúan en un campo magnético y conserven la imantación cuando desaparece el campo.
Hz	<i>Hertz</i> . Unidad de medida de la frecuencia.
Interarmónicos	Son tensiones o corrientes cuya frecuencia es un múltiplo no entero de la frecuencia fundamental de suministro.
Inversor	La función es convertir un voltaje de corriente continua en un voltaje de corriente alterna.

RMS	<i>Root mean square.</i> En electricidad y electrónica, en corriente alterna, el valor cuadrático medio de una corriente variable es denominado valor eficaz.
SCR	<i>Silicon controled rectifier.</i> El rectificador controlado de silicio es un dispositivo semiconductor de 4 capas que funciona como un conmutador.
Subestación	Conjunto de transformadores, interruptores o equipo eléctrico destinado a la alimentación de una red de distribución de energía eléctrica.
THD	<i>Total harmonic distorsion.</i> Es el valor de distorsión armónica total que hay en el sistema.
Transistor	Dispositivo semiconductor cuya función es abrir, cerrar un circuito o amplificar una señal.
UL	<i>Underwriters laboratories.</i> Es una consultoría de seguridad y certificación de la empresa.
UPS	<i>Uninterruptible power supply.</i> Equipo ininterrumpible como fuente de suministro eléctrico.
Vac	Voltaje de corriente alterna.
Vcd	Voltaje de corriente directa.

Voltios

Es la diferencia de potencial eléctrico o tensión eléctrica.

RESUMEN

En el primer capítulo se presentan los tres tipos de UPS que comúnmente se encuentran en el mercado a la venta; se indica las diferencias de funcionamiento, las partes internas, los diagramas de los tres tipos y los conceptos básicos, incluyendo componentes como baterías, transformadores y filtros.

En el segundo capítulo se definen los armónicos de manera general, se define la calidad de energía, las distorsiones de la red eléctrica, las potencias, productores o generadores de armónicas y su reducción, las normas para las distorsiones y sus límites de operación según IEEE.

En el capítulo tercero, donde se inicia el proceso de estudio eléctrico tanto en la entrada de un UPS como en su salida, se define lo que se considera como estudio eléctrico; se menciona el equipo utilizado en el presente trabajo y que se encuentra en el mercado para realizar los análisis correspondientes para definir la calidad de energía eléctrica; se mencionan los rangos y las variables a monitorear; se presentan los resultados de todas las mediciones realizadas y se realiza un análisis para poder determinar si la red presenta armónicos tanto de corriente como de voltaje en el sistema en el supuesto de que fuera generado por el UPS que se encontró en operación.

En el capítulo de efectos de las armónicas en la subestación y en la carga se hace un resumen de los efectos generales de la presencia de armónicos tanto en voltaje como en corriente.

Además, el impacto que puede tener la vida útil de los equipos conectados en la misma red eléctrica, el efecto en los transformadores y el efecto en la carga.

OBJETIVOS

General

Hacer un estudio de los diferentes fenómenos de la distorsión armónica mediante un análisis de calidad de energía en un sistema eléctrico y los efectos que estos pueden causar en sus equipos.

Específicos

1. Reducir los gastos en los consumos eléctricos de las instalaciones.
2. Prolongar de la vida útil de los equipos de una instalación.
3. Generar conocimiento de los armónicos en un sistema eléctrico.
4. Dar a conocer la cantidad de carga armónica que puede generar un UPS.
5. Demostrar los problemas que pueden generar los armónicos de voltaje o corriente en un sistema eléctrico o sus equipos periféricos.
6. Demostrar lo valioso y beneficioso de seguir una regulación que establezca los límites de distorsión armónica en un sistema eléctrico.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, debido a los diversos disturbios que se presentan en el sistema eléctrico del país, es necesario y en algunos según la aplicación hasta indispensable contar con UPS, para los procesos críticos y vulnerables a cortes, micro cortes y disturbios que se encuentren fuera del rango permitido por los fabricantes de equipos eléctricos y electrónicos.

Primero se iniciará con una explicación breve de los conceptos básicos que se deben tener presentes para poder entender de una mejor manera el presente trabajo.

En los temas desarrollados se especifican las diferencias de tres tipos de UPS que normalmente pueden encontrarse en el mercado; sin embargo, el trabajo se enfoca en un modelo específico el cual es denominado *online*.

Este modelo *online* tiene la característica de que, al momento de presentarse una falla en la entrada de alimentación de la acometida, el UPS inicia el proceso de alimentación a carga a través de las baterías; por tratarse de un modelo *online* el cambio de alimentación es prácticamente insensible para la carga que se encuentra alimentada por este equipo.

Esta gama de equipos permite que la conmutación entre el cambio de alimentación primaria no genere transitorios altos que puedan provocar problemas de calidad de energía en el sistema eléctrico conectado.

Uno de los puntos vitales que se demuestra en el presente trabajo es la relevancia de hacer una inversión la cual en muchas ocasiones sería más alta al elegir equipos con mayores desarrollos tecnológicos. Para este caso un equipo de uso en línea que incorpora filtros para tratar de evitar la presencia de carga armónica que pudiera ser generada por el mismo UPS o la carga.

Si bien se menciona que pudiera existir una inversión alta, debe considerarse que los equipos de gamas tecnológicas inferiores pueden ser una fuente de generación de armónicos, o bien, un puente de paso entre la carga y la subestación o viceversa, generando un costo intangible al tener degradación en la vida útil de los equipos instalados en el sistema eléctrico.

Los armónicos son finalmente distorsiones que pueden generarse sobre el voltaje o sobre la corriente, valores que deben ser sumados a la fundamental; para lo cual debe generarse un estudio de calidad de energía y determinar cuál armónica está presentando valores altos comparados con los permitidos por la regulación.

La regulación lo que trata es de indicar que si se superan los valores recomendados pueden generar problemas en los equipos o bien disparos no deseados en interruptores termomagnéticos provocando paros innecesarios.

Normalmente los armónicos de corriente son los más perjudiciales, pues estos pueden provocar calentamiento y debilitar aisladores, lo cual provoca calentamiento y pérdidas en el sistema eléctrico o en los transformadores.

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Sistema ininterrumpible de UPS

Un UPS es una fuente de suministro eléctrico que posee una batería con el fin de seguir dando energía a un dispositivo en el caso de interrupción eléctrica. Los UPS son llamados en español SAI (sistema de alimentación ininterrumpida).

Los UPS suelen conectarse a la alimentación de varios tipos de cargas como computadoras, máquinas industriales, equipos de precisión, entre otros, permitiendo usarlos varios minutos en el caso de que se produzca un corte eléctrico.

1.2. UPS según su tecnología

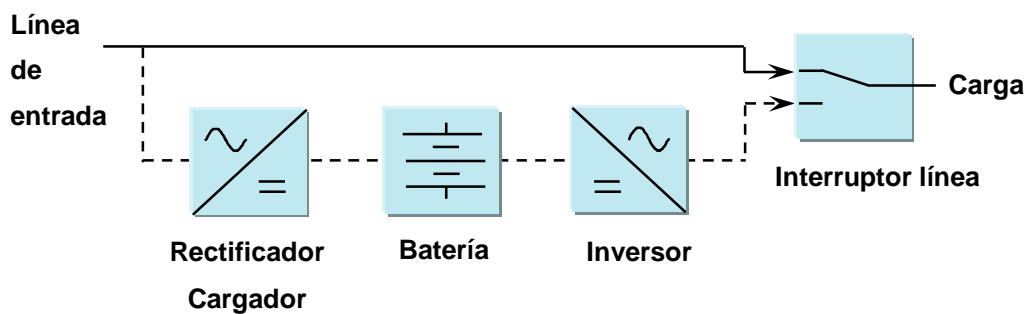
Se utiliza una variedad de enfoques de diseño para implementar sistemas UPS, cada uno de ellos con características de rendimiento diferenciadas. Los enfoques de diseño más comunes son los siguientes:

- *Stand-by*
- Línea interactiva
- *Online*

1.2.1. UPS pasivo *stand-by*

La UPS *stand-by* es la más común para usar con computadoras personales.

Figura 1. Diagrama de bloques UPS *stand-by*



Fuente: elaboración propia.

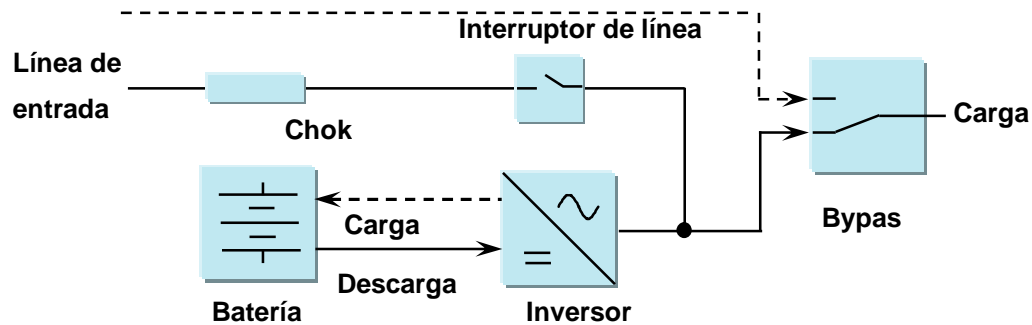
El interruptor de transferencia está programado para seleccionar la entrada de CA filtrada como fuente de energía primaria y conmutar al modo de batería/inversor como fuente de respaldo en caso de que falle la fuente primaria. Cuando esto sucede el interruptor de transferencia debe conmutar la carga a la fuente de energía de respaldo de batería/inversor. El inversor solo se enciende cuando falla la energía, de ahí el nombre *stand-by* (de reserva).

1.2.2. UPS línea interactiva

El sistema UPS de línea interactiva es el diseño más comúnmente utilizado para servidores de pequeñas empresas. En este tipo de diseño, el convertidor (inversor) de batería a alimentación CA siempre está conectado a la

salida del sistema UPS. Al accionar el inversor en reversa en momentos en que la alimentación CA de entrada es normal, se carga la batería.

Figura 2. **Diagrama de bloques UPS línea interactiva**



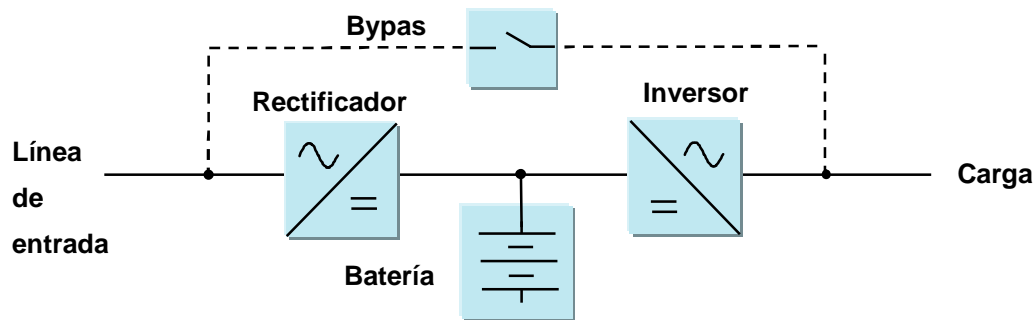
Fuente: elaboración propia.

Cuando falla la alimentación de entrada, el interruptor de transferencia se abre y el flujo de energía se produce desde la batería hasta la salida del sistema UPS. Con el inversor siempre activo y conectado a la salida, este diseño ofrece un filtro adicional y produce transitorios de conmutación reducidos en comparación con la topología de la UPS *stand-by*.

1.2.3. **UPS online**

Este es el tipo más común de UPS para rangos superiores a 10 kVA. El diagrama de bloques de la UPS *online* es el mismo que para la UPS *stand-by*, excepto que el circuito de energía primario es el inversor en lugar de la red de CA.

Figura 3. Diagrama de bloques UPS *online*



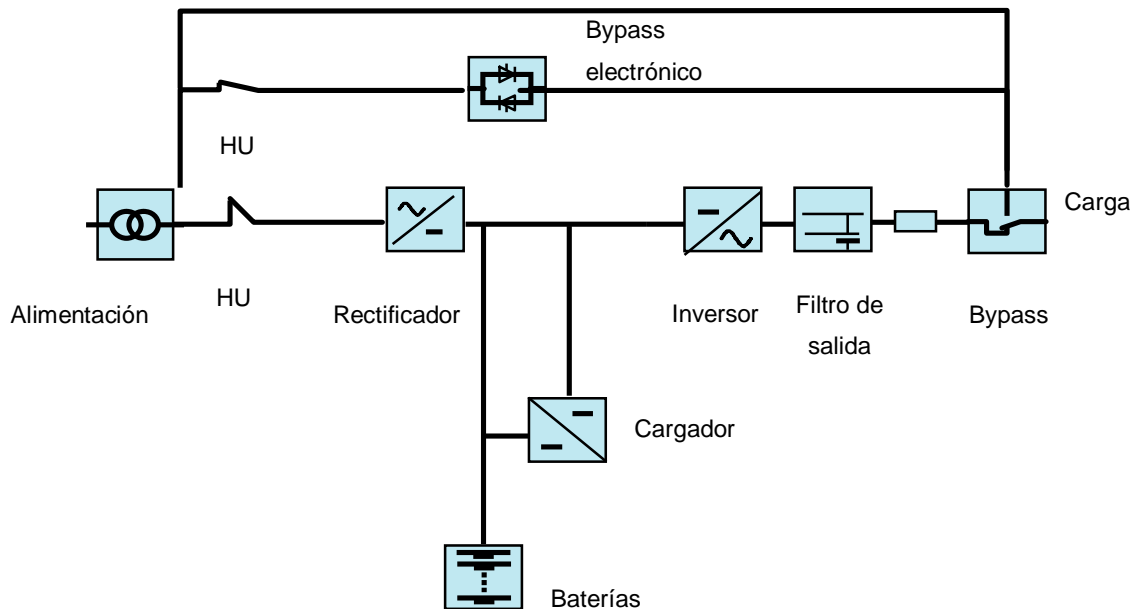
Fuente: elaboración propia.

Cuando falla la alimentación de entrada, el interruptor de transferencia se abre y el flujo de energía se produce desde la batería hasta la salida del sistema UPS. Con el inversor siempre activo y conectado a la salida, este diseño ofrece un filtro adicional y produce transitorios de conmutación reducidos en comparación con la topología de la UPS *stand-by*.

1.3. Diagrama interno del UPS

Internamente el UPS está integrado por las siguientes partes: rectificador, inversor, baterías, *by-pass*, transformador y filtros entre otros.

Figura 4. Diagrama interno del UPS



Fuente: elaboración propia.

1.3.1. Rectificador

Este módulo de potencia se encarga de transformar el voltaje alterno de alimentación a un voltaje regulado de corriente directa, su función principal consiste en suministrar una alimentación estable al banco de baterías y al módulo inversor.

El rectificador / cargador puede estar compuesto de 6 o 12 pulsos los cuales controlan un puente rectificador de onda completa a base de tiristores.

El rectificador está diseñado con la suficiente capacidad como para alimentar al inversor con carga al 100 % y el banco de baterías totalmente descargado.

El rectificador a tiristores hace uso de la técnica de control de fase mediante la cual, para obtener el deseado valor de tensión continua, se emplea solamente una porción de la onda alterna aplicada al puente rectificador. De esta forma es posible conseguir tanto una estabilidad en la tensión de salida de cc frente a variaciones de la tensión de red y carga como cualquier otra característica como: limitación de intensidad de salida o de la intensidad que circula por cualquier rama del circuito de corriente continua.

Como la tensión continua de salida es función de la tensión alterna aplicada y del ángulo de disparo de los tiristores o, dicho de otro modo, de la porción de onda aprovechada, basta regular el ángulo de disparo para compensar las variaciones de tensión aplicada al puente o producidas por la propia regulación del transformador.

Los rectificadores de 6 pulsos son trifásicos, en puente de 6 tiristores se caracterizan por el alto factor de utilización del transformador que, unido al buen rendimiento y elevada velocidad de respuesta de los circuitos a tiristores, hacen de él un sistema comúnmente empleado por su robustez.

El rectificador de 12 pulsos es un convertidor ca/cc estático que emplea para la rectificación de dos puentes trifásicos de 6 tiristores cada uno, intercalados entre sí y acoplados en paralelo con un transformador de interfase.

Esta conexión se usa en rectificadores de potencias elevadas con valores considerables de la corriente de salida para reducir la distorsión de la onda de intensidad de c.a. absorbida de la red que es, con esta configuración, del 12 %.

Este proceso, denominado rectificación, consta de tres etapas: en la primera se rectifica la señal convirtiendo la entrada negativa en positiva al tiempo que se disminuye la diferencia de potencial empleando un transformador; en la segunda se realiza un filtrado que disminuye el rizado de la señal pulsante rectificadora obteniendo una señal triangular y, en la tercera la señal se nivela obteniendo una salida continua constante.

1.3.2. Inversor

La sección del inversor contiene transistores que son conectados en serie a través de la barra regulada de Vcd y convierte el voltaje del busbar a un voltaje alterno ajustable para energizar la carga crítica.

Básicamente los transistores del inversor actúan como un switch, su salida de voltaje toma una forma de onda tipo cuadrada con una igual amplitud al voltaje del busbar DC y frecuencia determinada por el radio de sus cambios. En el inversor controlado por PWM los transistores del inversor son combinados a una frecuencia más alta que la utilizada en la salida del UPS.

Una frecuencia moduladora elevada ofrece un control de respuesta rápido que es necesario para alcanzar una salida suave. Se asistirá por un filtro de paso conectado entre la salida del inversor y la carga que remueve cualquiera de las frecuencias sobrantes para conseguir una forma de onda senoidal.

1.3.3. Baterías

Un sistema de baterías debe suministrar intensidad durante un cierto tiempo sin que la tensión de los polos descienda al valor mínimo. El producto de una intensidad por el tiempo (Ah) se denomina la capacidad. El fabricante indica el valor de la capacidad nominal de la batería. Las baterías nuevas tienen que estar en operación durante un cierto tiempo para dar su capacidad máxima.

A medida que envejecen las baterías, desciende la capacidad. Entonces la batería no puede suministrar la intensidad especificada durante tan largo tiempo como previamente. En condiciones favorables, la vida de servicio de una batería puede llegar hasta los 20 años, pero hay muchas que duran bastante menos.

Midiendo la capacidad actual, se puede determinar si es hora de cambiar el sistema de baterías o si se puede seguir usando durante más tiempo. Se puede ahorrar mucho dinero averiguando el momento correcto de reemplazo para cada batería. El envejecimiento de una batería aumenta progresivamente con el tiempo. Por ello es importante medir regularmente la capacidad.

El método más seguro y mejor establecido para determinar la capacidad de un sistema de baterías es efectuando el ensayo de descarga. El sistema de baterías deberá estar bien cargado antes del ensayo, lo cual se efectúa descargando la batería con una intensidad constante indicada por el fabricante. Esto continúa hasta que la tensión de la batería haya alcanzado un nivel equivalente al de una batería descargada.

El tiempo necesario para alcanzar esta tensión mínima multiplicado por la intensidad nos da la capacidad actual. A intervalos regulares, se mide la tensión

de las celdas. La medida de la tensión de las celdas al final del ensayo tiene especial importancia para revelar las celdas débiles.

1.3.3.1. Tipos de baterías

Básicamente, las baterías se clasifican en primarias o secundarias según la manera como convierten su energía química en energía eléctrica. La batería primaria convierte energía química directamente en energía eléctrica, usando los materiales químicos que se hallan dentro de la celda para iniciar la acción. La batería secundaria debe cargarse primeramente con energía eléctrica, antes de que pueda convertir energía química en energía eléctrica. La batería secundaria suele llamarse acumulador, ya que almacena la energía que se le suministra.

Las baterías se clasifican también en celdas húmedas o celdas secas. En la batería de celda húmeda se utilizan substancias químicas en estado líquido, en tanto que las celdas llamadas secas contienen una pasta química. La celda es la unidad básica de una batería. Una batería a menudo consta de numerosas celdas conectadas de manera que alimenten un voltaje o corriente mayor que la que pueda proporcionar una sola celda. Sin embargo, actualmente se utilizan indistintamente los términos celda y batería.

1.3.3.2. Baterías secundarias

Las celdas primarias tienen graves limitaciones debido a que su vida útil es relativamente breve, el proceso de recarga de la celda seca sólo es temporal, la celda húmeda se puede reparar, pero, debido a esto es delicada y generalmente su uso es meramente experimental.

La celda secundaria se creó para una vida útil muy larga, de manera que puede ser construida de consistencia sólida para aplicaciones portátiles, la diferencia básica entre la celda primaria y la secundaria es la siguiente: la celda primaria convierte la energía química que tiene en energía eléctrica y al hacerlo se destruye lentamente.

Al principio, la celda secundaria no tiene mucha energía electroquímica y primero hay que cargarla suministrándole la energía que necesita, entonces la celda almacena dicha energía hasta que esta se utilice. Por esta razón, a la celda seca también se le llama acumulador; cuando se toma energía eléctrica del acumulador, se dice que la celda está descargándose. Cuando la celda está completamente descargada ya no puede transmitir energía eléctrica, pero a diferencia de la celda primaria, se puede recargar.

Básicamente, al cargarse, la celda secundaria convierte la energía eléctrica en energía química. Luego, al descargarse vuelve a convertir la energía química en energía eléctrica. Los acumuladores que más se usan son el de plomo-ácido y varios tipos de acumuladores alcalinos.

1.3.3.3. Baterías de celdas múltiples

Se ha explicado anteriormente que, aunque el término pila y batería se usan actualmente en forma indistinta, en una época el término batería se usaba solo para designar una combinación de celdas. La mayor parte de las aplicaciones, el voltaje y la corriente que puede producir una sola celda no son suficientes de manera de que muchas baterías disponen de combinaciones de celdas. Cuando se necesita un voltaje más alto, las celdas se conectan en serie de manera que sus voltajes se suman.

Las celdas se pueden conectar dentro de la batería o combinarse baterías separadas para obtener mayor voltaje. Todas las polaridades tienen que estar en la misma dirección, de lo contrario, los voltajes se restarían. En una combinación en serie, la misma corriente pasa por todas las celdas de manera que en este tipo de pila no aumenta la capacidad de corriente. En efecto, la corriente total que puede producir la batería será la que corresponde a la celda más débil.

Para aumentar la capacidad de corriente, las celdas deben conectarse en paralelo. Entonces cada celda suministrará su propia corriente y la capacidad total de corriente será igual a la suma de la de todas las celdas. También en este caso, las celdas deben conectarse con la misma polaridad. De lo contrario, unas celdas transmitirán corriente a otras y la combinación estará en corto circuito. Además, todas las celdas deben tener la misma capacidad de voltaje, pues de otra manera, la que tenga mayor voltaje transmitirá corriente a la que lo tenga menor. Conectando celdas en combinaciones en serie y paralelo, se pueden obtener mayores capacidades de voltaje y corriente.

1.3.4. *By-pass*

El *by-pass* estático es un elemento del UPS que le permite, conseguir que equipos que tengan una arrancada muy elevada puedan arrancar sin sobrecargar las etapas de potencia; en algunos modelos de UPS es bastante necesario.

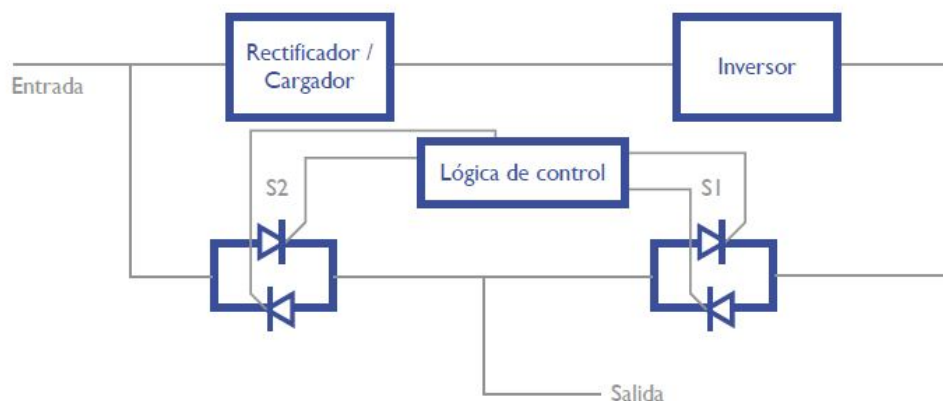
Cuando la UPS trabaja en condiciones normales, el interruptor de salida (denominado de acá en adelante S1) formado por dos SCR en antiparalelo está activo y la salida es alimentada por el inversor de la UPS. Esta salida normalmente se debe encontrar sincronizada con el voltaje de entrada.

Cuando la UPS por alguna condición anómala como sobrecarga o fallo del inversor o por orden del usuario realiza la transferencia a red. Las señales de control en el interruptor S1 son deshabilitadas mientras que las del interruptor de entrada (denominado de acá en adelante S2) son activadas de modo que la transferencia de voltajes se haga en el cruce por cero.

Los interruptores S1 y S2 están constituidos por elementos de estado sólido. Cada interruptor está formado por dos SCR en antiparalelo en los cuales existe una caída de tensión de 0,4V A 0,8V por naturaleza propia de estos elementos. Esta caída de tensión junto con la corriente que demanda la carga produce una pérdida de potencia que debe disiparse adecuadamente; para esto se ha de usar un disipador acoplado a estos elementos semiconductores que en ocasiones demanda gran cantidad de espacio.

La ventaja de este tipo de switch estático radica en su alta capacidad para soportar conmutaciones repetitivas.

Figura 5. **Diagrama del *by-pass***



Fuente: Masterguard SIII. *Manual de usuario del UPS*. p. 84.

1.3.5. Transformador

El transformador básicamente se utiliza como un medio de aislamiento galvánico, desarrolla una función de aislamiento sobre la red eléctrica entre la entrada y la salida consiguiendo evitar los picos y transitorios; además, de ruido eléctrico de alta frecuencia.

1.3.6. Filtros

El filtro de línea reduce las variaciones transitorias de voltaje debidas al encendido y apagado de ciertos aparatos; además, reduce el ruido eléctrico que viene con el voltaje de alimentación del UPS para que aparezca en niveles más seguros en la carga.

Cabe hacer la aclaración de que el filtro de línea solo reduce problemas de variación de voltaje que son de tiempo muy corto, por el rango de los milisegundos y nanosegundos. No es su función regular el voltaje.

El filtro de línea consiste en bobinas las cuales rechazan voltajes de alta frecuencia y capacitores conectados a tierra para que cualquier alta frecuencia sea drenada a tierra.

2. ARMÓNICOS

2.1. Calidad de energía

El término calidad de energía eléctrica se emplea para describir la variación de la tensión, corriente, y frecuencia en el sistema eléctrico.

Los disturbios en el sistema, que se han considerado normales durante muchos años, ahora pueden causar desorden en el sistema eléctrico industrial, con la consecuente pérdida de producción. Adicionalmente, deben tomarse en cuenta nuevas medidas para desarrollar un sistema eléctrico confiable, mismas que anteriormente no se consideraron significativas.

Es importante darse cuenta de que existen otras fuentes de disturbios que no están asociadas con el suministro eléctrico de entrada. Estas pueden incluir descargas electrostáticas, interferencia electromagnética radiada, y errores de operadores. Adicionalmente, los factores mecánicos y ambientales juegan un papel en los disturbios del sistema. Estos pueden incluir temperatura, vibración excesiva y conexiones flojas.

2.1.1. Definición de armónicos

Los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

En un sistema de potencia eléctrica, los aparatos y equipos que se conectan a él están diseñados para operar a 50 o 60 ciclos, con una tensión y corriente sinusoidal.

Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias de 50 o 60 ciclos sobre algunas partes del sistema de potencia o dentro de la instalación de un usuario.

La forma de onda existente está compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental.

El término componente armónico o simplemente armónico se refiere a cualquiera de los componentes sinusoidales mencionados previamente, el cual es múltiplo de la fundamental. La amplitud de los armónicos es generalmente expresada en por ciento de la fundamental.

2.1.2. Calidad de la potencia

Determina las características físicas de las señales de tensión y corriente para un tiempo y espacio determinados, con el fin de minimizar las fallas de alimentación eléctrica, aumentando la confiabilidad y optimizando la productividad de las empresas.

La deficiente calidad en el suministro de energía produce una operación ineficiente e inadecuada de los equipos eléctricos y electrónicos incidiendo directamente en su vida útil, afectando los procesos industriales e incrementando los costos de operación.

2.2. Distorsiones de la forma de onda

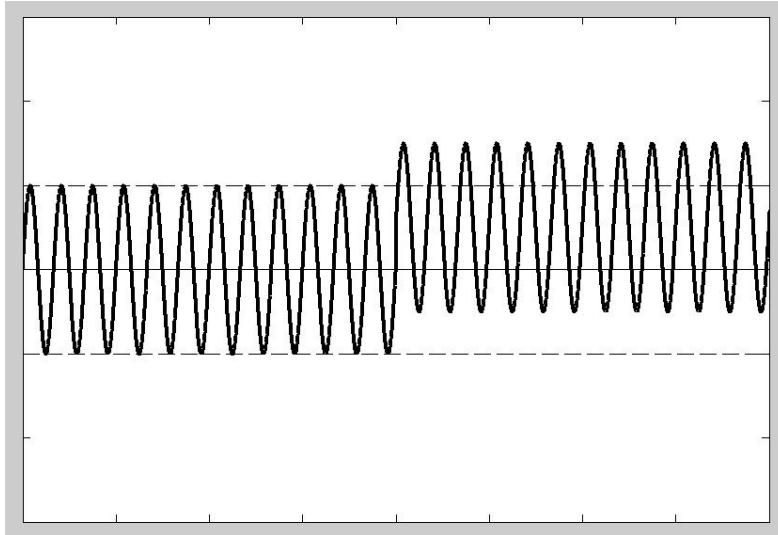
La distorsión de la forma de onda se define como una desviación del estado estable desde una forma de onda perfectamente sinusoidal de la frecuencia del sistema caracterizado por el contenido espectral de la desviación. A continuación, se presentan cinco tipos primarios de distorsión de la forma de onda:

- Variación de voltaje continuo
- Armónicas
- Interarmónicas
- *Notching*
- Ruido

2.2.1. Variación de voltaje continuo

La presencia de voltaje de corriente directa en la línea puede ser el resultante de perturbaciones geomagnéticas o por efecto de las medias ondas en los sistemas de rectificación. La CD en un sistema de energía alterna puede ser perjudicial en los núcleos de los transformadores ya que pueden llevar a la saturación en la operación normal. Esto causa adicionalmente calentamiento y disminución en la vida de un transformador. La corriente directa puede causar deterioro electrolítico en los electrodos y conectores de las puestas a tierra.

Figura 6. **Distorsión de onda DC offset**



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNE), Universidad Autónoma de Honduras. *Introducción a la calidad del servicio eléctrico*. p. 23.

2.2.2. Armónicos

Son voltajes o corrientes sinusoidales que tienen frecuencia múltiple a la fundamental los cuales se originan en cargas no lineales en un sistema de potencia. Las distorsiones de armónicas tienen un completo espectro con magnitudes y ángulos de fase de cada componente individual de cada armónica.

2.2.3. Interarmónica

Se llaman interarmónicos a las tensiones o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual trabaja el sistema.

La principal fuente de producción de interarmónicos son los convertidores de frecuencia estáticos, ciclos convertidores, motores de inducción.

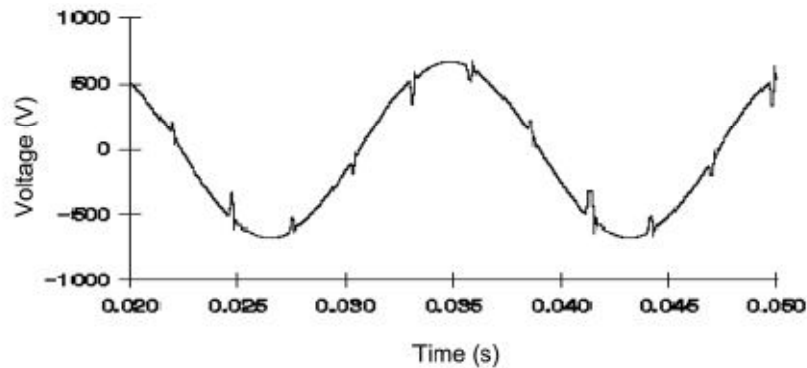
Los interarmónicos se pueden encontrar en redes de todas las clases de tensiones. Las principales fuentes de interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, los ciclos convertidores, los motores asincrónicos y los dispositivos de arco.

2.2.4. *Notching*

El *notching* es un periodo de disturbio del voltaje causado por la operación normal de convertidores electrónicos cuando la corriente es conmutada desde una fase a otra (período de conmutación).

Como los *notching* pueden ser tratados como un efecto en estado estable, esto puede ser caracterizado a través de su contenido armónico. Sin embargo, esto es generalmente tratado como un caso especial. Las componentes de frecuencia asociadas con los *notching* pueden ser realmente elevadas y no ser prontamente caracterizadas por los equipos de medición convencionales.

Figura 7. **Notching o hendiduras de tensión**



Fuente: IEEE, estándar 1159-2009. *Prácticas recomendadas para el monitoreo de la calidad de energía eléctrica.* p. 21.

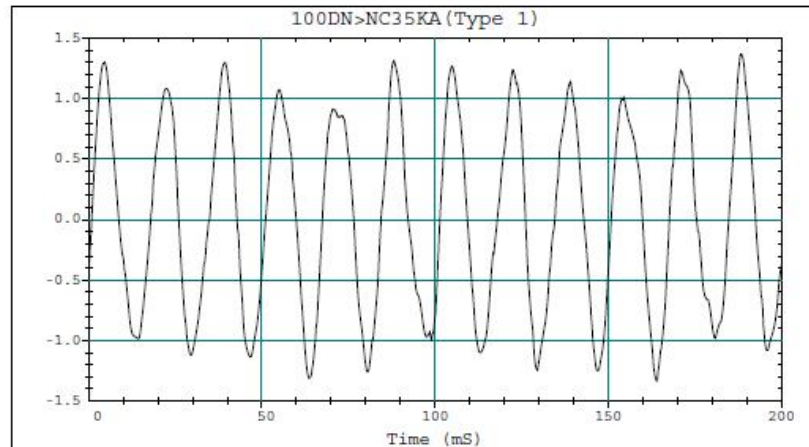
2.2.5. Ruido

El ruido se define como señales eléctricas inesperadas dentro de un contenido espectral menor a 200 kHz súper puestos a las ondas de corriente o voltaje en las fases conductoras, en los conductores neutros o líneas de señal; este ruido puede ser causado por circuitos de control, cargas con rectificadores de estado sólido y fuentes de energía conmutada o conmutable. Los problemas de ruido pueden a menudo ser excitados por instalaciones inapropiadas de puesta a tierra. Básicamente, el ruido consiste en cualquier distorsión insoportable de la señal de potencia que no puede ser clasificada como distorsión de armónica o transiente.

2.2.6. Fluctuaciones de voltaje

Las fluctuaciones de voltaje son variaciones sistemáticas del voltaje sobre una serie de cambios inesperados de este y magnitudes que no exceden normalmente los rangos especificados con ANSI C84.1 de 0.9 A 1.1 pu.

Figura 8. **Fluctuaciones de voltaje**



Fuente: IEEE, estándar 1159-2009.

Prácticas recomendadas para el monitoreo de la calidad de energía eléctrica. p. 22.

2.3. **Armónicos**

Los niveles de distorsión armónica son descritos por el espectro armónico completo con magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónico individual.

También es común usar una sola cantidad, *The total harmonic distortion* (THD), como una medida del valor efectivo. Los niveles de distorsión de corriente pueden ser caracterizados por un valor THD.

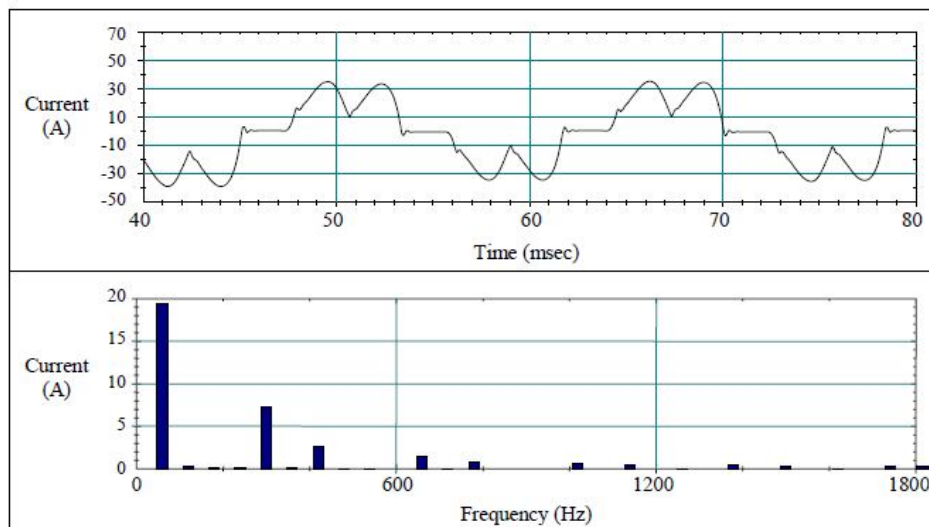
Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan:

- su amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico.

- su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz).

Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir, $3 * 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$.

Figura 9. **Forma de onda de corriente y espectro de armónica**



Fuente: IEEE, estándar 1159-2009.

Prácticas recomendadas para el monitoreo de la calidad de energía eléctrica. p. 20.

El orden del armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia del fundamental (60 Hz).

En matemáticas el análisis armónico o análisis de Fourier estudia la representación de funciones o señales como superposición de ondas básicas o armónicos.

Las series de Fourier se utilizan para descomponer una función, señal u onda periódica como suma infinita o finita de funciones, señales u ondas armónicas o sinusoidales, es decir, una serie de Fourier es un tipo de serie trigonométrica.

2.4. Medidas de distorsión

Para cuantificar la distorsión existente en una señal, es preciso definir parámetros que determinen su magnitud y contar con equipos de medición adecuados. A continuación, se presentan las expresiones necesarias para efectuar los cálculos relacionados con la distorsión armónica.

Valor eficaz (rms): cuando se suman señales de voltaje o corriente de diferentes frecuencias para obtener su resultante.

$$\text{Corriente eficaz (rms)} \quad I_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad \text{ec (1 - 1)}$$

$$\text{Voltaje eficaz (rms)} \quad V_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad \text{ec (1 - 2)}$$

Cofactor de distorsión (Cd): es la relación entre el contenido armónico de la señal y su valor eficaz (rms). Su valor se ubica entre 0 % y 100 %. También se conoce como thd y es el índice más ampliamente usado.

Con una distorsión baja, Cd cambia notoriamente, por eso se recomienda su uso cuando se desea conocer el contenido armónico de una señal.

$$\text{Cofactor de distorsión (Cd)} \quad Cd = \left(\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} / I_{rms} \right) * 100 \% \quad \text{ec (1 - 3)}$$

Distorsión armónica total (THD): es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0 % e infinito.

Es el parámetro de medición de distorsión más conocido, por lo que es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales (I y V). Al igual que el Cd es útil cuando se trabaja con equipos que deben responder solo a la señal fundamental, como en el caso de algunos relevadores de protección.

$$\text{Distorsión armónica total} \quad THD = \left(\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} / I_1 \right) * 100 \% \quad \text{ec (1 - 4)}$$

Distorsión de demanda total (TDD): Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga.

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519.

$$\text{Distorsión de demanda total} \quad TDD = \left(\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} / I_L \right) * 100 \% \quad \text{ec (1 - 5)}$$

Donde:

I_h = magnitud de la armónica individual.

h = orden armónico.

I_L = demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede estimarse.

2.5. Potencia armónica y fundamental

Para definir la relación de potencias en sistemas eléctricos se utiliza ampliamente la relación:

$$S = P + jQ \quad \text{ec (1-6)}$$

Donde:

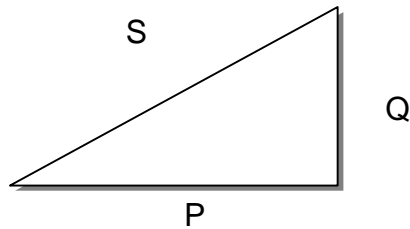
S: potencia aparente

P: potencia activa

Q: potencia reactiva

Su representación fasorial es el triángulo de potencias y muestra que P se ubica en el eje real, mientras Q está en el imaginario, estando ambos en cuadratura y S es la resultante.

Figura 10. **Triángulo de potencias**



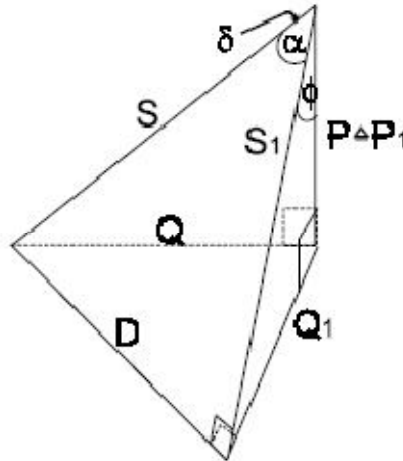
Fuente: elaboración propia.

Con esta expresión, pero utilizando las energías medidas, los suministradores de la electricidad, calculan el factor de potencia para efectos de facturación. Estos conceptos son válidos mientras el sistema sea lineal, es decir, no exista distorsión armónica.

Las cargas no lineales son las que generan la distorsión armónica en corriente, que, al fluir por el cableado y el transformador de distribución, producen la distorsión en voltaje.

Para aquellos sistemas en los que la distorsión en voltaje es nula o mínima y existe distorsión armónica en corriente, se utiliza la pirámide de potencias para considerar tanto los valores fundamentales como los armónicos.

Figura 11. Pirámide de potencias



Fuente: *Distorsión armónica AP&C*. p. 10.

Para poder aplicarlo correctamente, se revisarán los conceptos relacionados.

Potencia aparente	$S = V * I_{rms} = V\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_n^2}$	ec (1 – 7)
-------------------	---------------------------------------------------	------------

Potencia eficaz	$P = P_1 = VI_1 \cos(\phi_1)$	ec (1 – 8)
-----------------	-------------------------------	------------

Potencia reactiva	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	ec (1 – 9)
-------------------	------------------------	------------

Potencia reactiva fundamental	$Q_1 = VI_1 \sin(\phi_1)$	ec (1 – 10)
-------------------------------	---------------------------	-------------

Potencia distorsionante	$D = V\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$	ec (1 – 11)
-------------------------	---------------------------------------------	-------------

Factor de potencia fundamental	$FP_1 = \frac{P}{S_1} = \cos(\phi_1)$	ec (1 – 12)
--------------------------------	---------------------------------------	-------------

Factor de potencia $FP = \cos(\alpha_1) * \cos(\phi_1) = \cos(\delta) = \frac{P}{S}$ ec (1 – 13)

Relación entre potencias:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \text{ec (1 – 14)}$$

$$S1^2 = P^2 + Q1^2 \quad \text{ec(1 – 15)}$$

$$Q^2 = Q1^2 + D^2 \quad \text{ec (1 – 16)}$$

$$S^2 + S1^2 + D^2 \quad \text{ec (1 – 17)}$$

$$S^2 = P^2 + Q1^2 + D^2 \quad \text{ec (1 – 18)}$$

2.6. Secuencias

Se refiere al giro del fasor con respecto a la fundamental denotada F, expresado en otras palabras indica el sentido en que giraría el rotor de un motor, al ser excitado por esa señal. Secuencia directa (+) indica que el sentido de giro es el horario. Secuencia inversa (-) indica un sentido de giro antihorario. Secuencia cero (0) indica que no gira.

Dependiendo de su secuencia y rotación, los armónicos presentan diferentes efectos:

A. Secuencia (+): rotación directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.

B. Secuencia (-): rotación inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y pueden quemar los motores de inducción trifásicos.

C. Secuencia (0): los armónicos de secuencia cero (llamados normalmente *triplens*) se suman al neutro de la red (si esta es de cuatro hilos) y son los causantes de sobrecalentamientos.

2.7. Fuentes de armónicas

Los sistemas eléctricos de potencia son muy vulnerables a la presencia de armónicos debido a la conexión de cargas no lineales en los sistemas de distribución. Estas son básicamente de dos tipos: monofásicas y trifásicas.

Una carga es lineal cuando, excitada por una tensión senoidal, la corriente que circula por ella también es senoidal de la misma frecuencia (aunque puede variar su amplitud o fase). Así, las cargas típicas (resistencias, inductancias y capacitancias) se comportan de forma lineal.

Una carga es no lineal si conectada a la red eléctrica absorbe corrientes en impulsos bruscos, los cuales crean ondas de corriente distorsionadas que originan a su vez corrientes armónicas de retorno hacia otras partes del sistema de alimentación.

2.8. Reducción de armónicas

La compensación de armónicos está dividida en la compensación de voltaje o de corriente.

La compensación de voltaje armónico no es tan conocida, debido a que normalmente los voltajes en el punto del consumidor se mantienen dentro de los límites permitidos para sobre voltaje y distorsión armónica.

La compensación de corriente armónica es muy importante en aplicaciones de baja y media potencia. La ventaja de aplicar la compensación de esta forma es que reduce en gran parte la distorsión del voltaje en el punto de conexión de la carga. Las corrientes armónicas pueden resultar muy malas para la red eléctrica, producen pérdidas y sobrecalentamiento en los transformadores, calentamientos en los motores de inducción, pérdidas en el cobre de los conductores por efecto piel, pérdidas dieléctricas en condensadores; pueden producir operaciones anormales y fallas en los equipos, errores en los equipos de medida y efectos de resonancia.

2.9. Normas

El IEEE ha definido los límites en sistemas de potencia para los armónicos, generando un documento de aplicación donde menciona el estándar 519-2014, fijando los límites para la distorsión armónica de voltaje THDV y distorsión armónica de corriente THDI.

2.10. Límites de distorsión de voltaje

El IEEE ha definido los límites de distorsión de voltaje recomendados según la norma IEEE 519 que se muestran en la tabla 1.

THD: distorsión armónica de voltaje total en porcentaje de voltaje de frecuencia fundamental nominal. Los límites dados en la tabla 1 pueden ser usados como valores de diseño de sistemas para el “peor de los casos”, con una operación normal.

Límites de distorsión de voltaje en general para sistemas de distribución de 120 V hasta 69 000 V.

Tabla I. **Límites de distorsión de voltaje para sistemas de distribución de 120V hasta 69 000V**

Table 1—Voltage distortion limits		
Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

^aHigh-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects will have attenuated at points in the network where future users may be connected.

Fuente: IEEE. *Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, p.6.

2.11. Límites de distorsión de corriente

La limitación normalizada por la norma IEEE 519 sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica se define en la tabla 2.

El límite de los clientes individuales es la cantidad de corriente armónica que ellos pueden inyectar en la red de distribución. Los límites de corriente se basan en el tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución.

Los límites de distorsión de corriente en general para sistemas de distribución de 120 V hasta 69 000 V.

Tabla II. **Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución de 120V hasta 69 000V**

Table 2. <i>IEEE Std 519-1992 Harmonic Current Limits</i>						
Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V Through 69000 V)						
Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.						
Current distortions that result in a dc offset, e.g. half-wave converters, are not allowed.						
* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .						
Where						
I_{sc}	= maximum short-circuit current at PCC.					
I_L	= maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.					
TDD	= Total demand distortion (RSS), harmonic current distortion in % of maximum demand load current (15 or 30 min demand).					
PCC	= Point of common coupling.					

Fuente: IEEE, *Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, p.7.

3. ESTUDIO ELÉCTRICO PARA DETERMINAR PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL UPS

En este capítulo se presentarán los resultados que se obtuvieron del analizador de energía, buscando determinar la generación de armónicos por el uso de UPS en una instalación, cuya aplicación era respaldar la carga crítica de una data center. La medición se realiza en la salida y entrada de alimentación del UPS para determinar la carga armónica en el área de subestación y en el área de la carga.

El equipo de monitoreo es un UPS de 250 kVA con voltaje de operación de 400 Vac.

3.1. Definición de estudio eléctrico

El estudio eléctrico de una instalación o una red se realiza mediante el uso de un equipo denominado analizador de redes eléctricas, es un equipo ideal para las distribuidoras eléctricas para realizar campañas de medición de perturbaciones y casos de estudios especiales como, por ejemplo, registros de eventos, calidad de energía y registro de fallas.

3.2. Equipo a utilizarse en el estudio

Analizador de calidad de energía marca FLUKE modelo *Dranetz Power Guide 4400*.

UPS instalado de 250 kVA en voltaje de operación 400 Vac marca *Masterguard* de la serie SIII.

3.3. Variables a registrarse y tiempo de muestreo

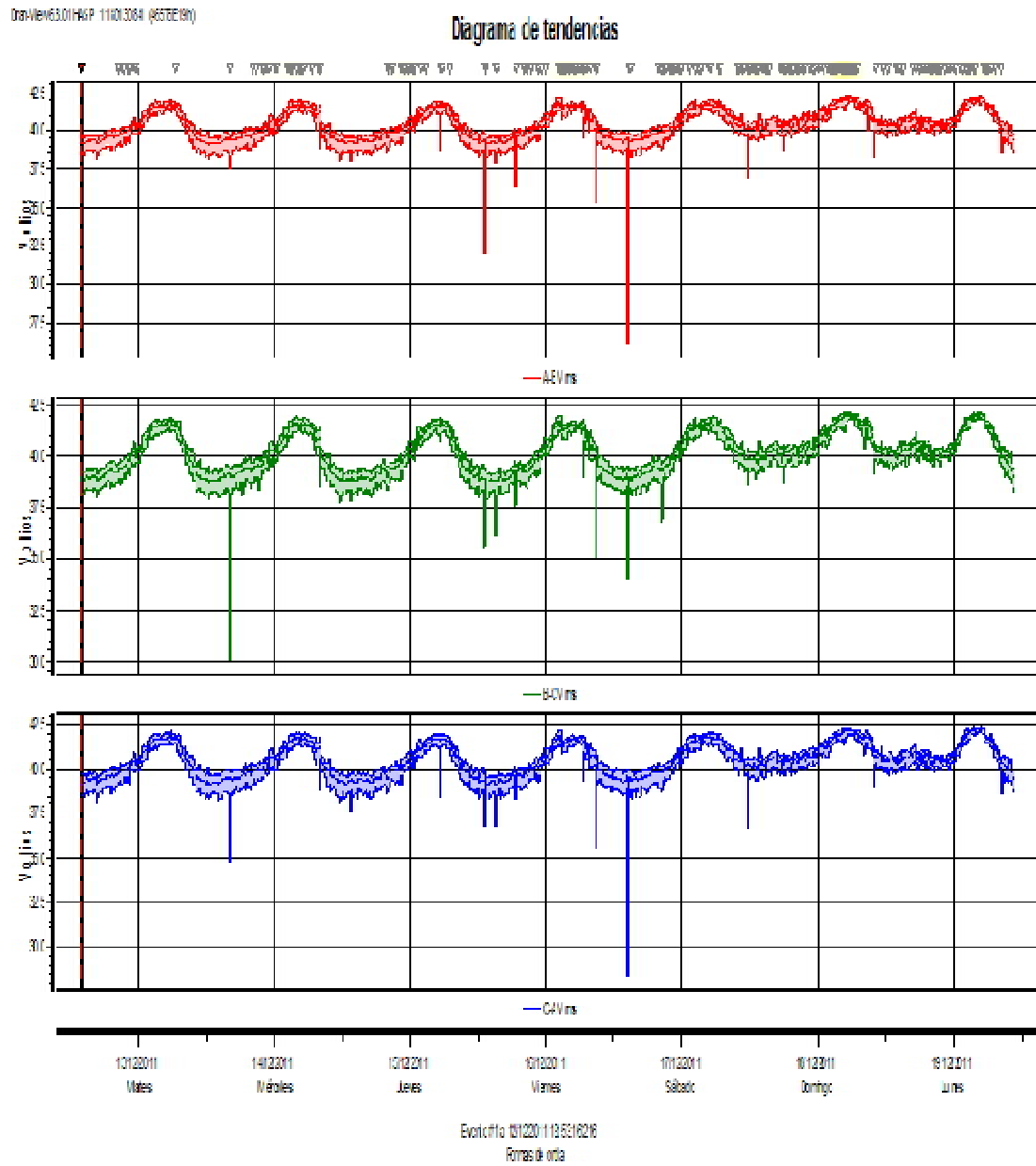
Las variables de registro por el analizador son varias, entre las más importantes para el presente análisis serán: voltaje, corriente, frecuencia, porcentaje de distorsión armónica de voltaje, porcentaje de distorsión armónica de corriente, potencia activa, reactiva y factor de potencia.

Todas las variables antes mencionadas estarán siendo registradas por un periodo de 7 días continuos.

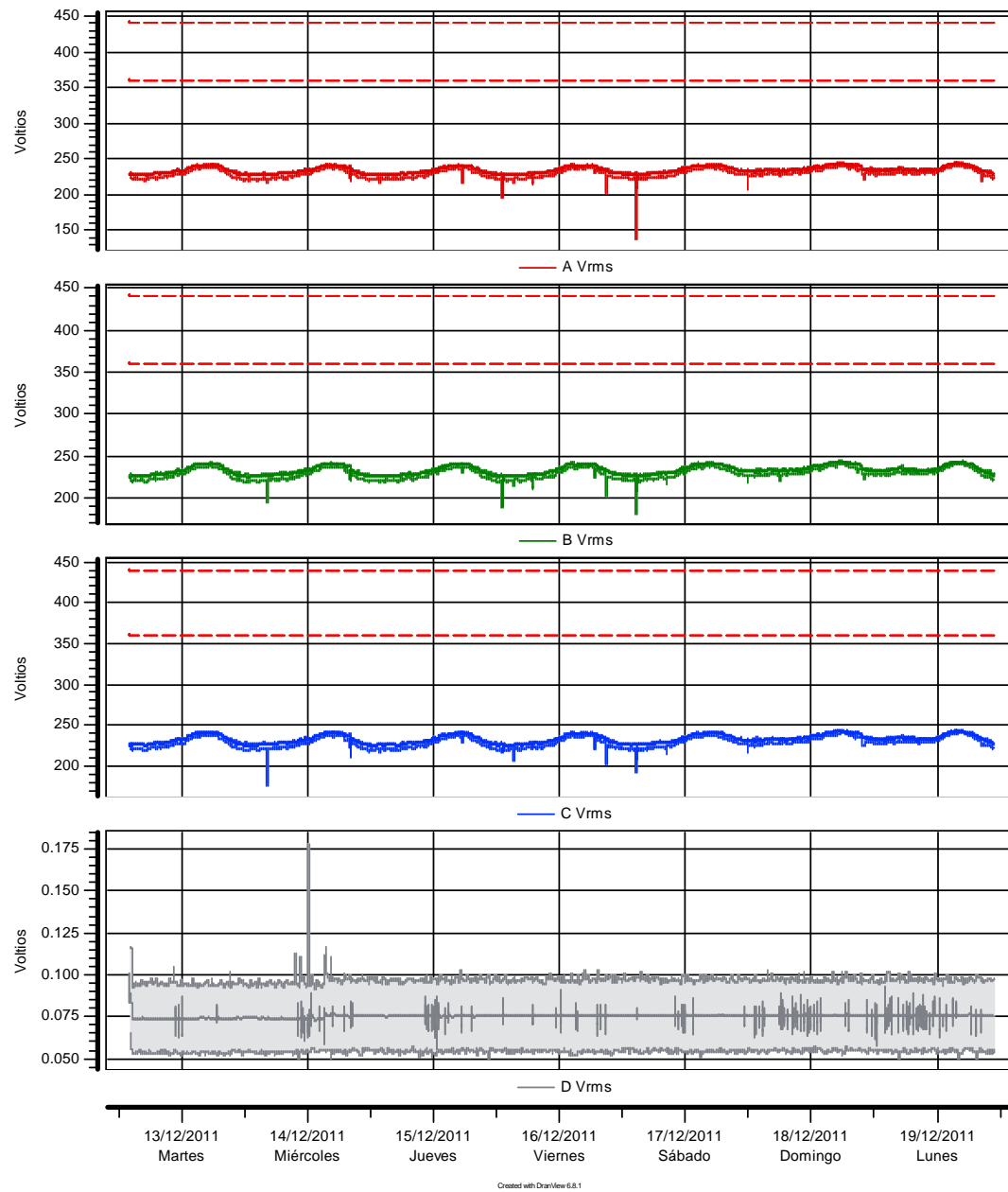
3.4. Resultados

A continuación se representan los resultados en las siguientes figuras.

Figura 12. Diagramas de tensión

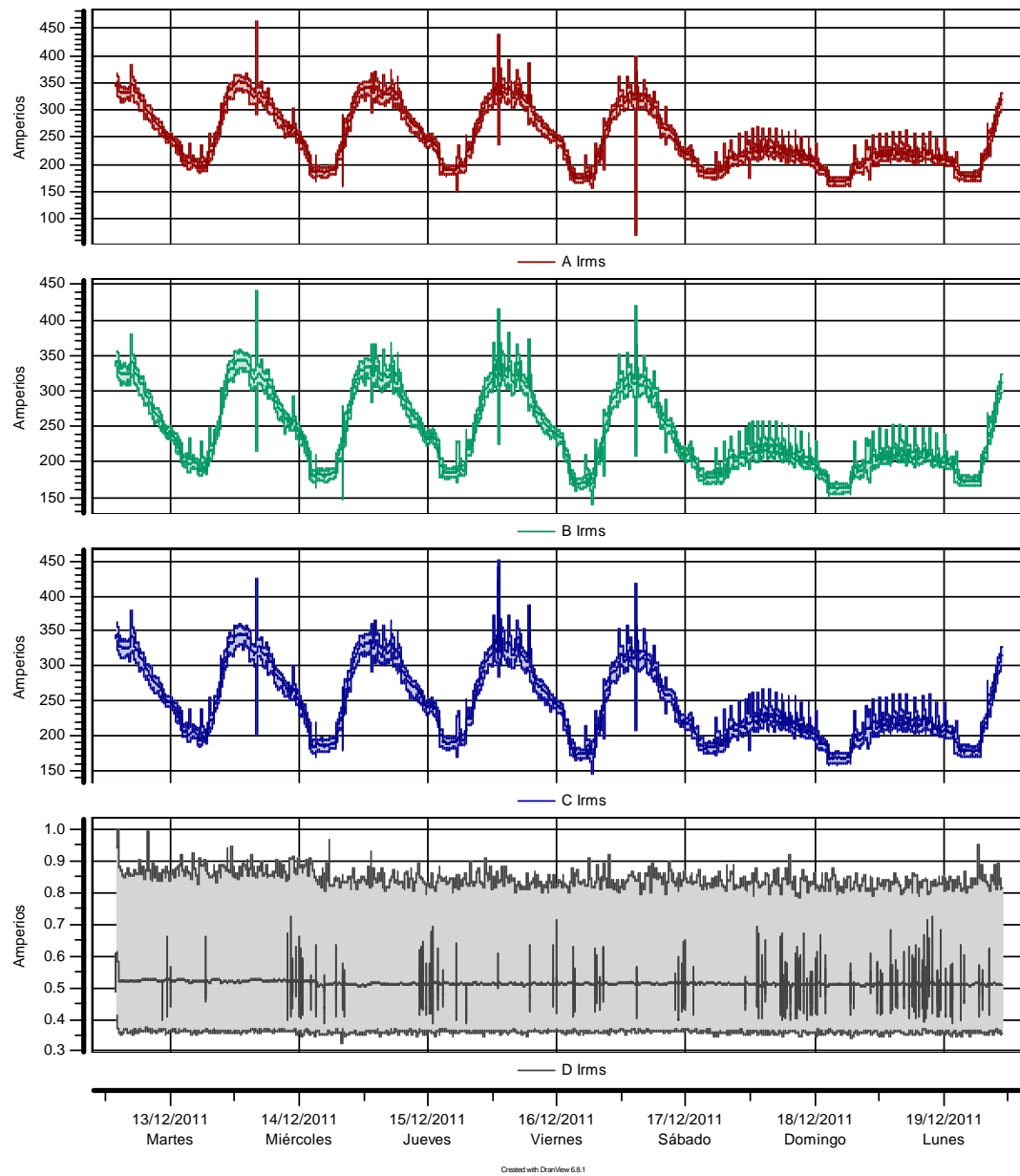


Continuación de la figura 12.



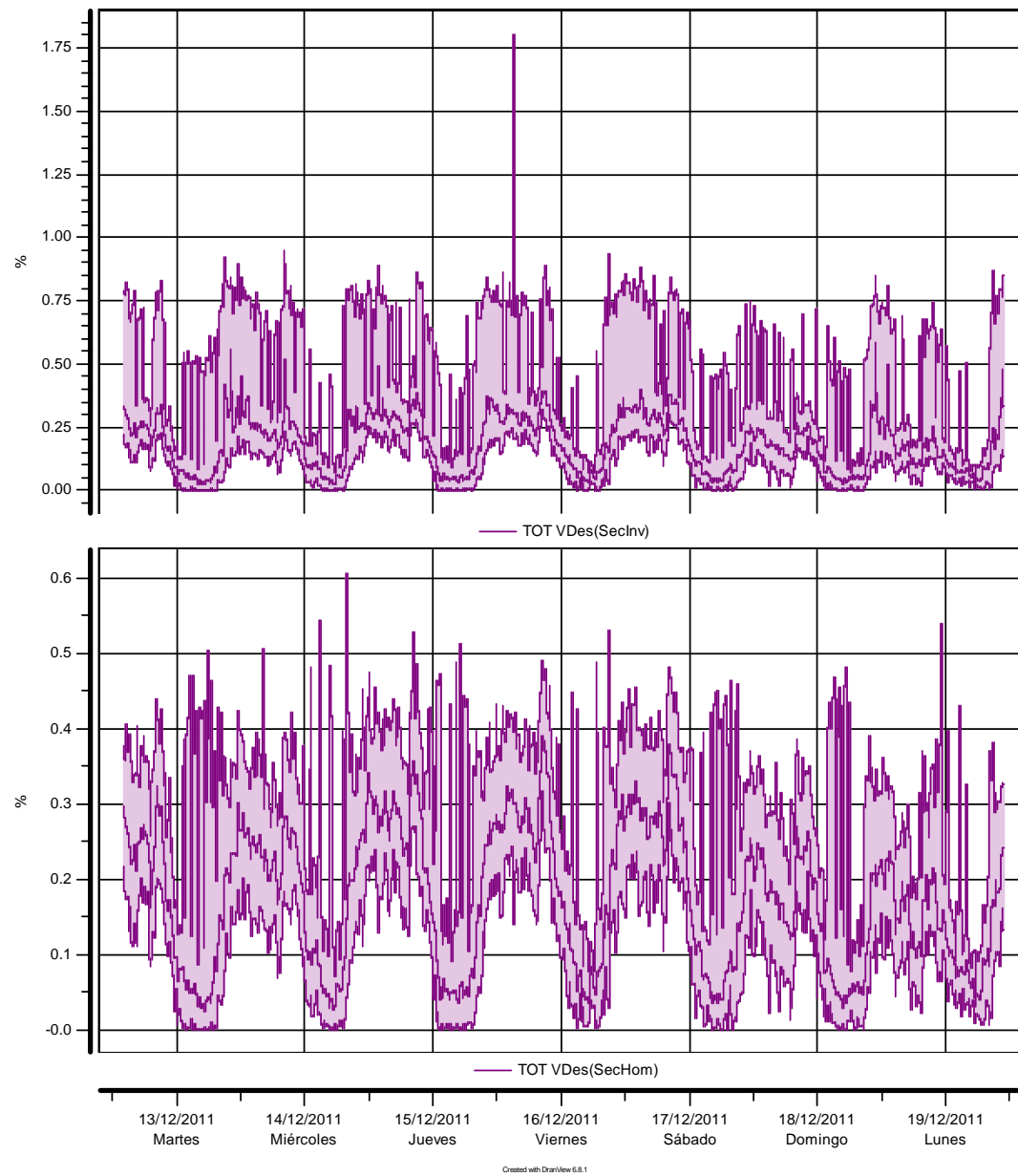
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Diagramas de intensidad



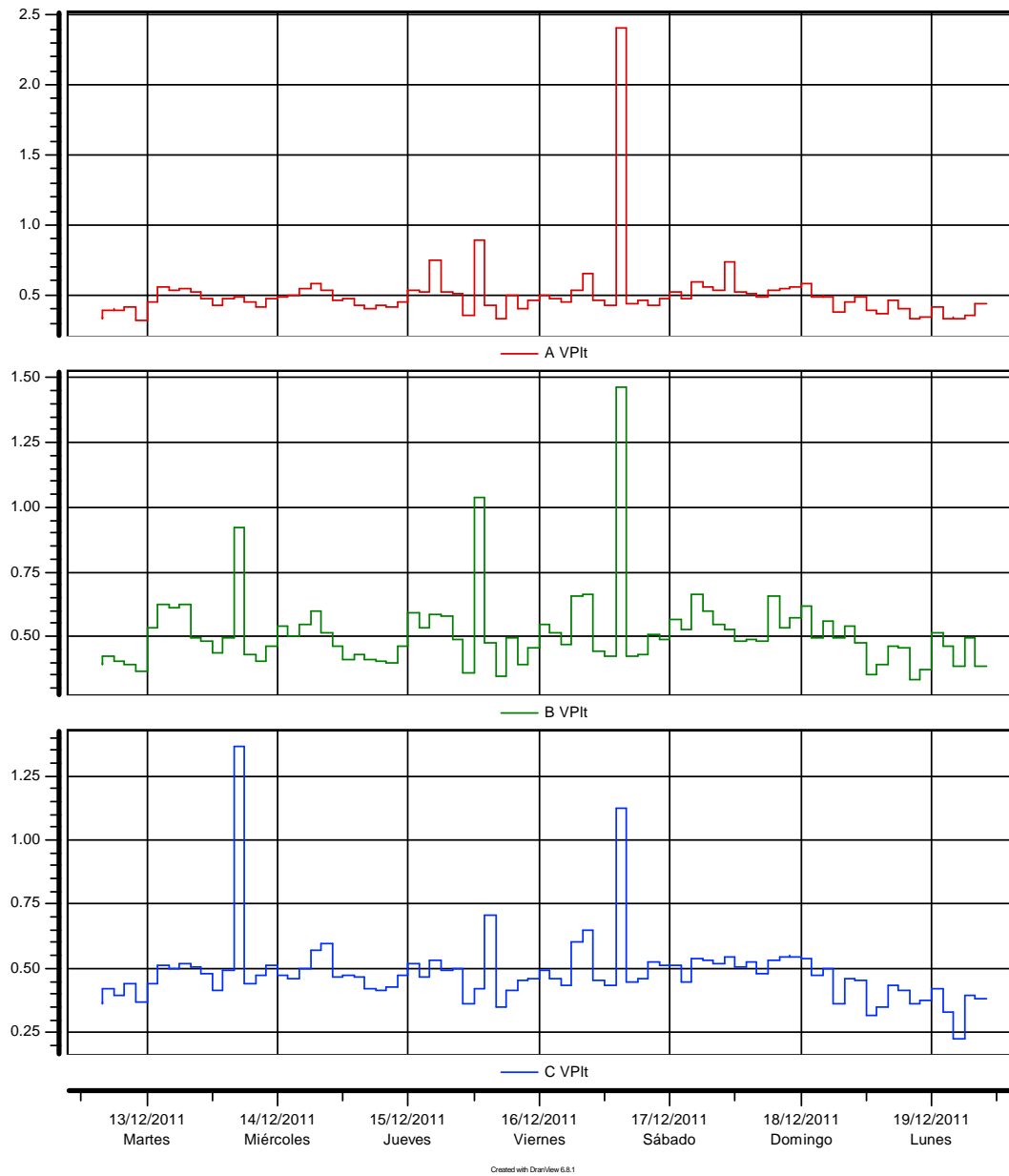
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Diagramas de desequilibrio de tensión



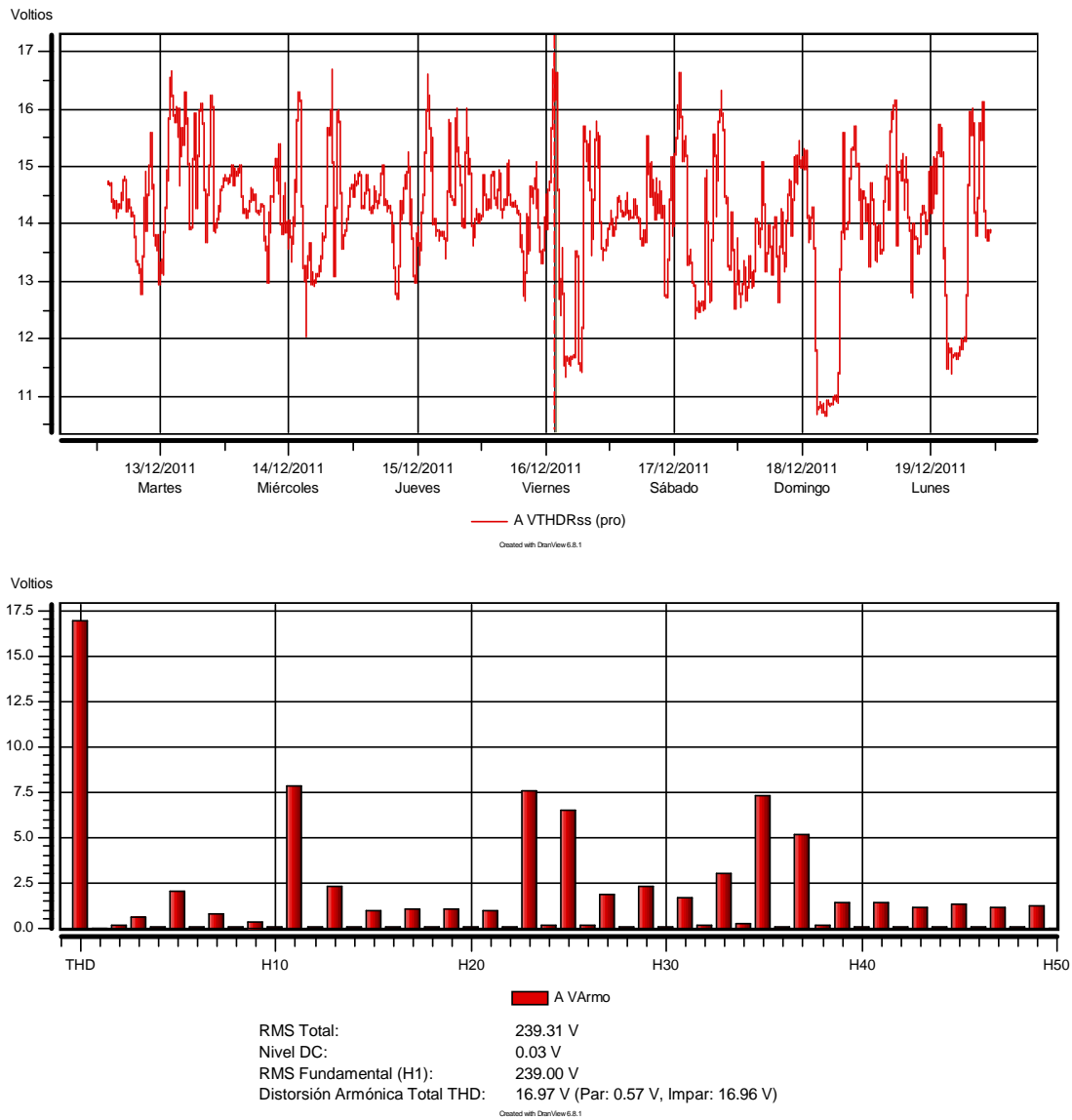
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Diagramas de *flicker* (PLT)



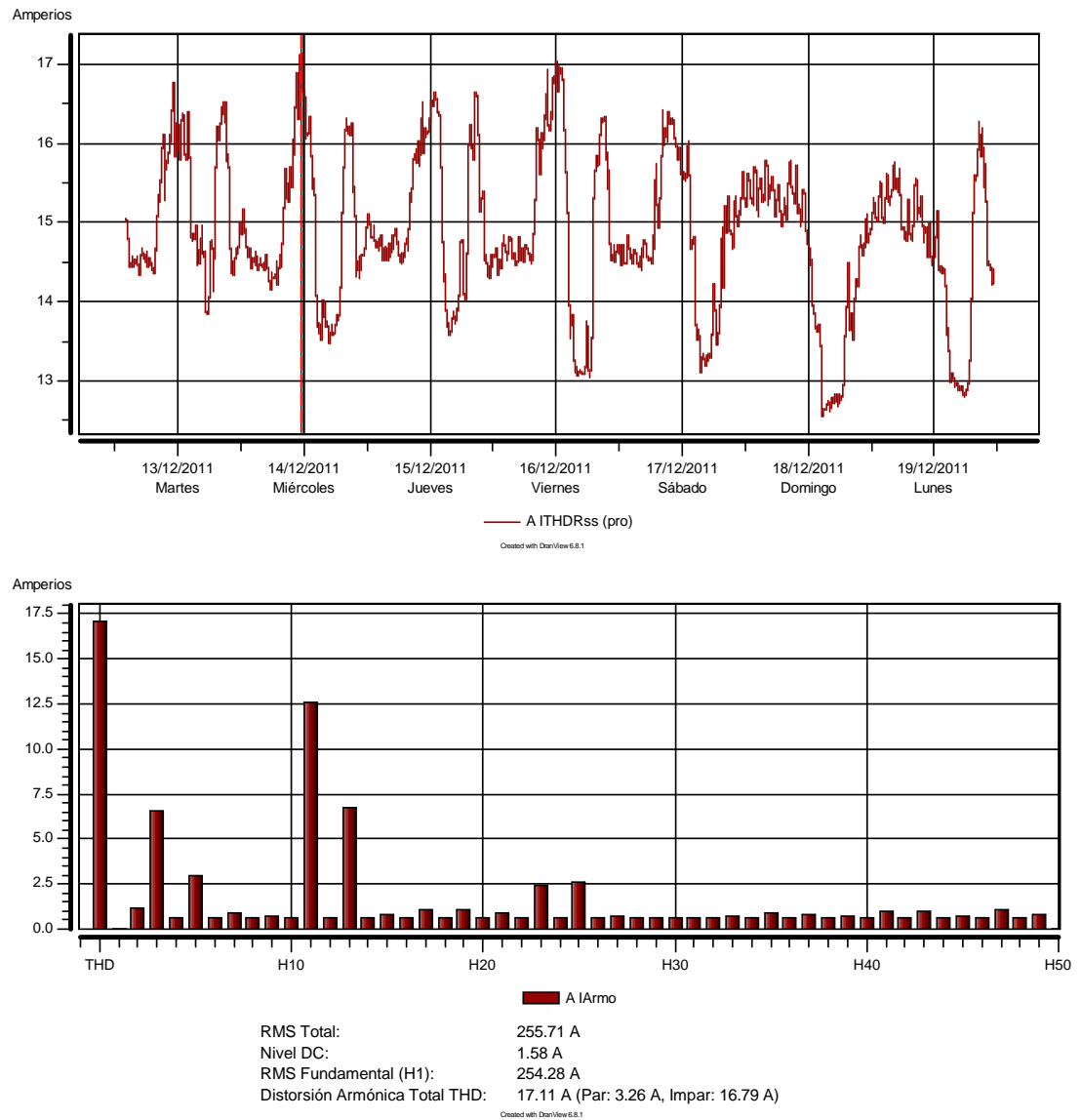
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Diagrama de fase A del armónico –tensión



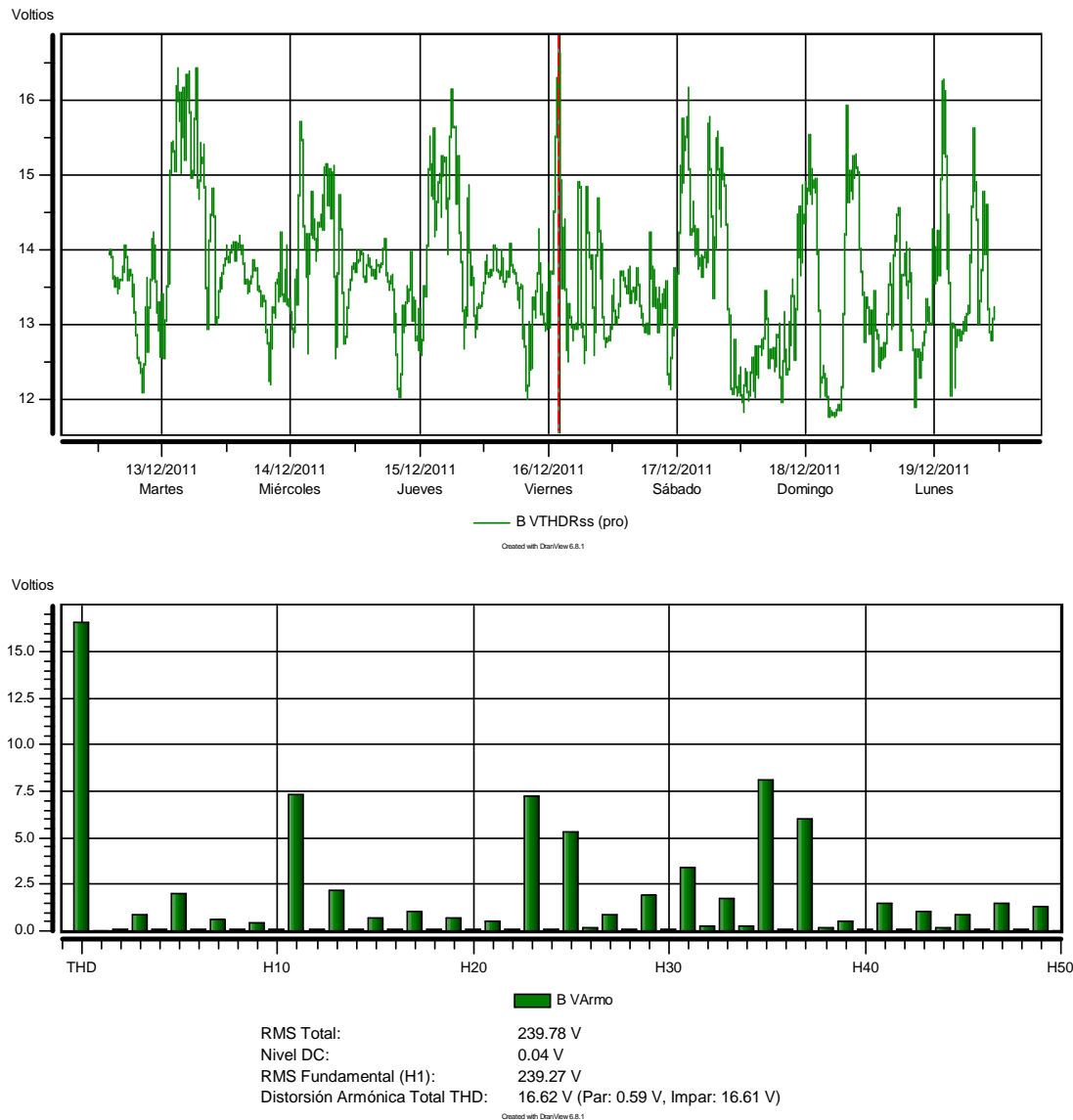
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Diagrama de fase A del armónico – intensidad



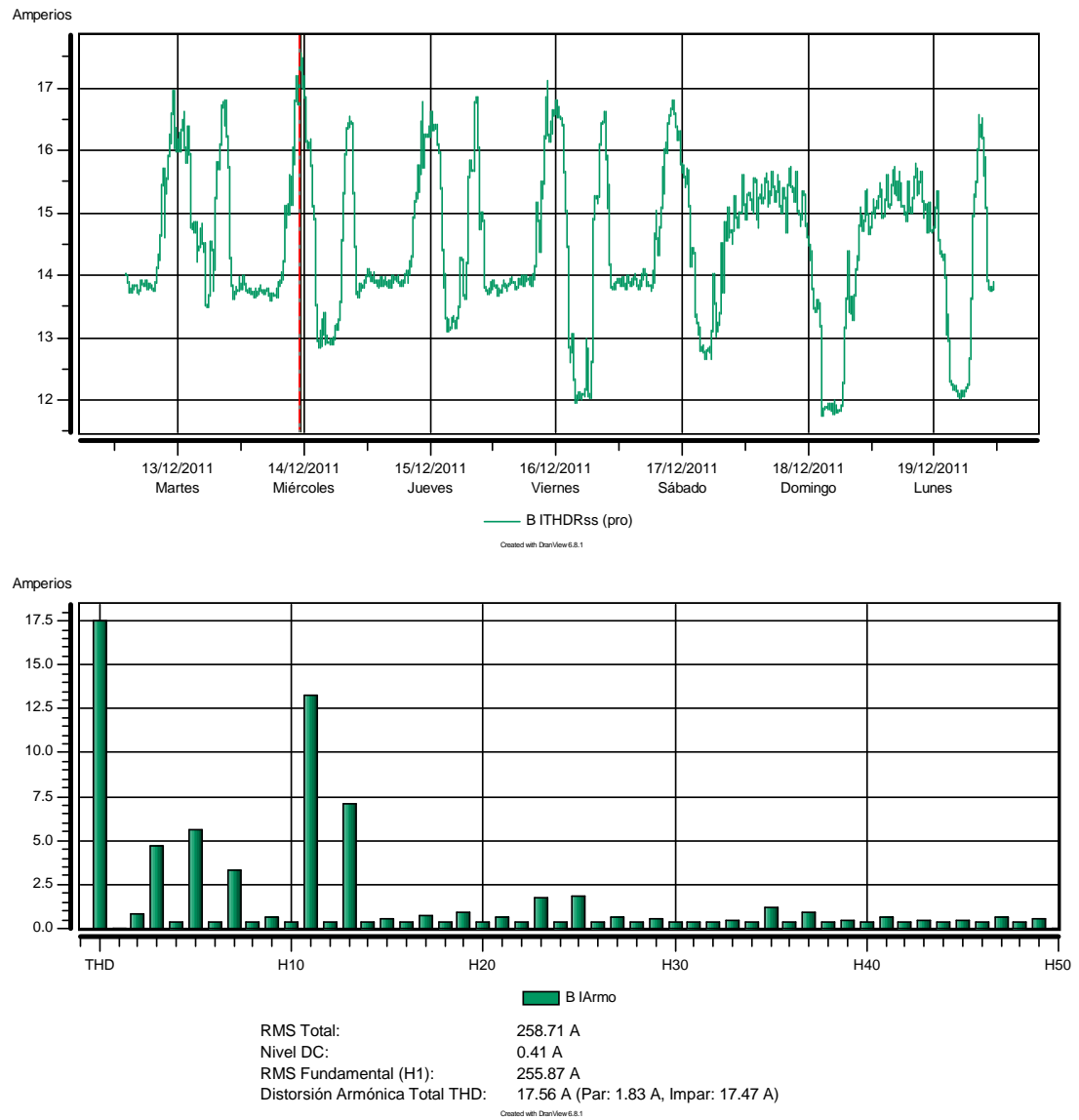
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Diagrama de fase B del armónico – tensión



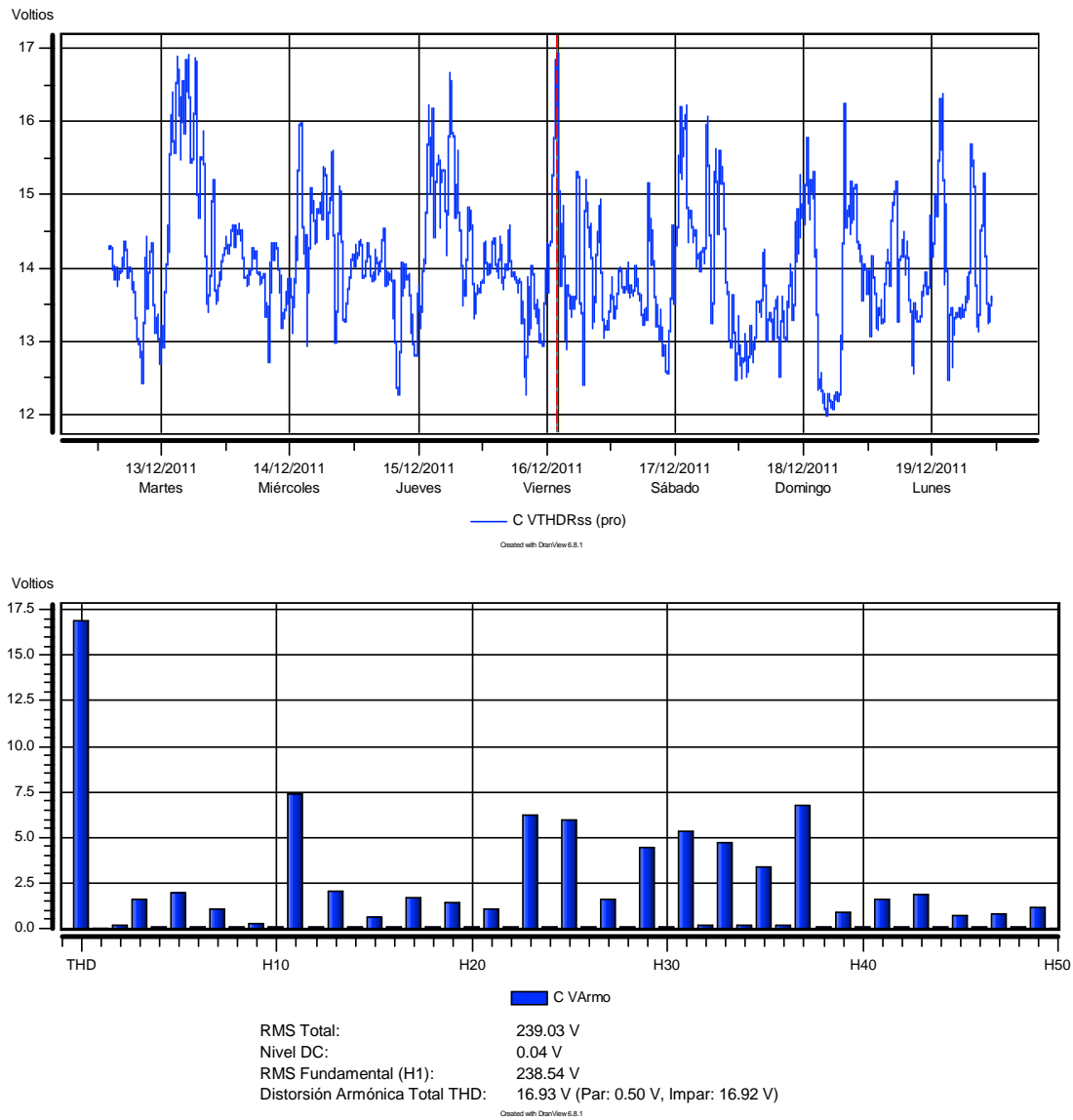
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Diagrama de fase B del armónico – intensidad



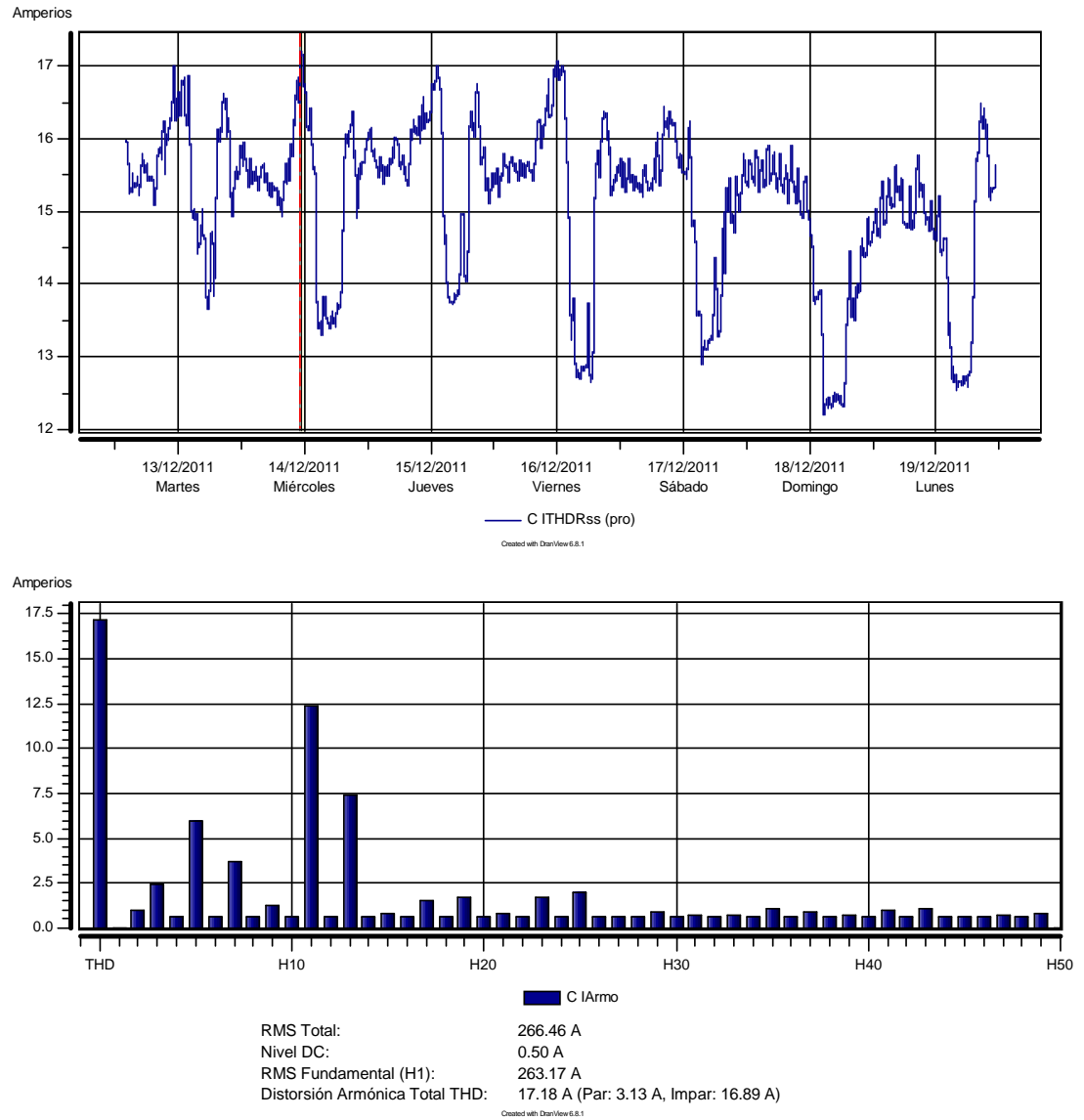
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Diagrama de fase C del armónico – tensión



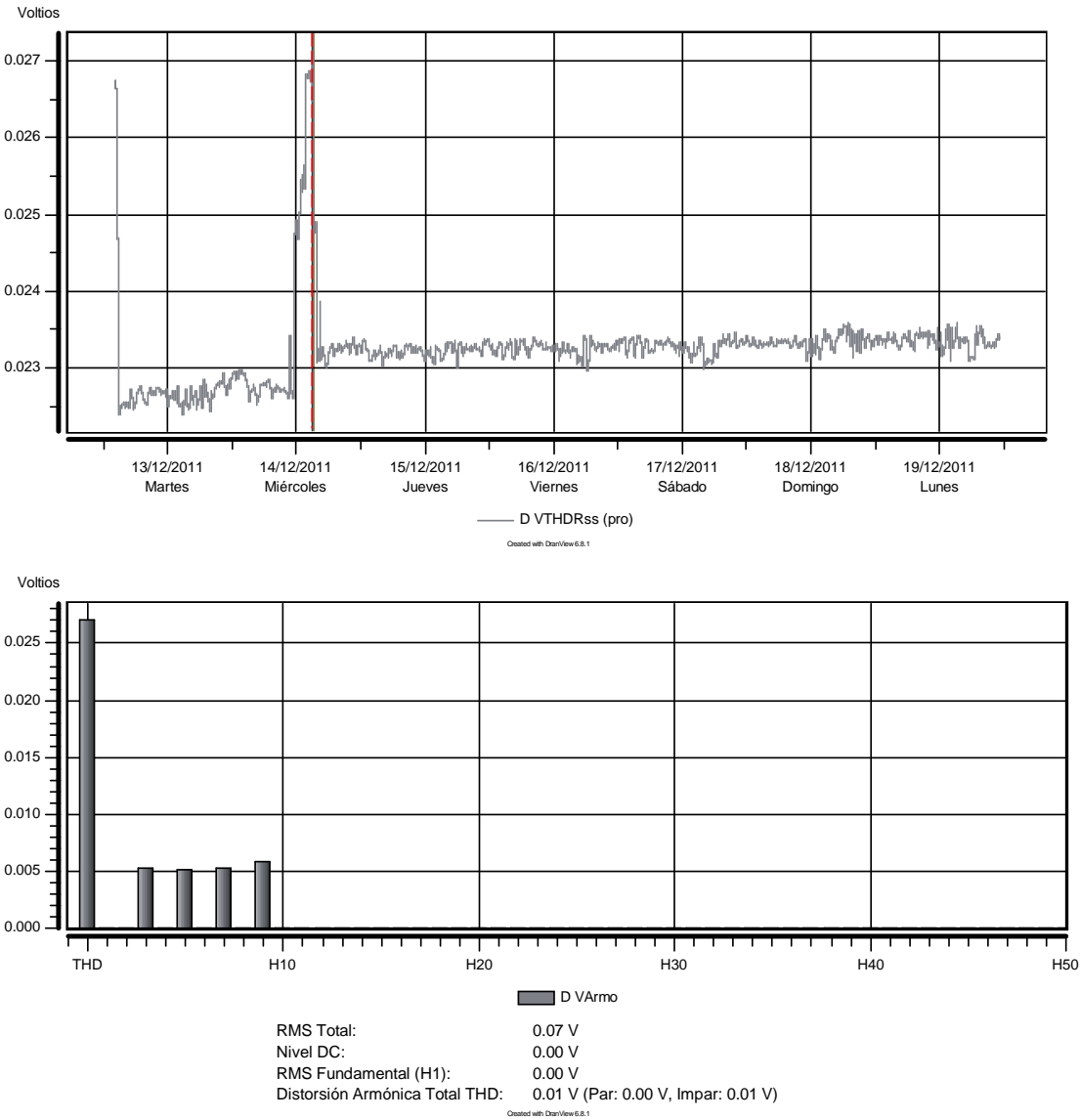
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Diagrama de fase C del armónico



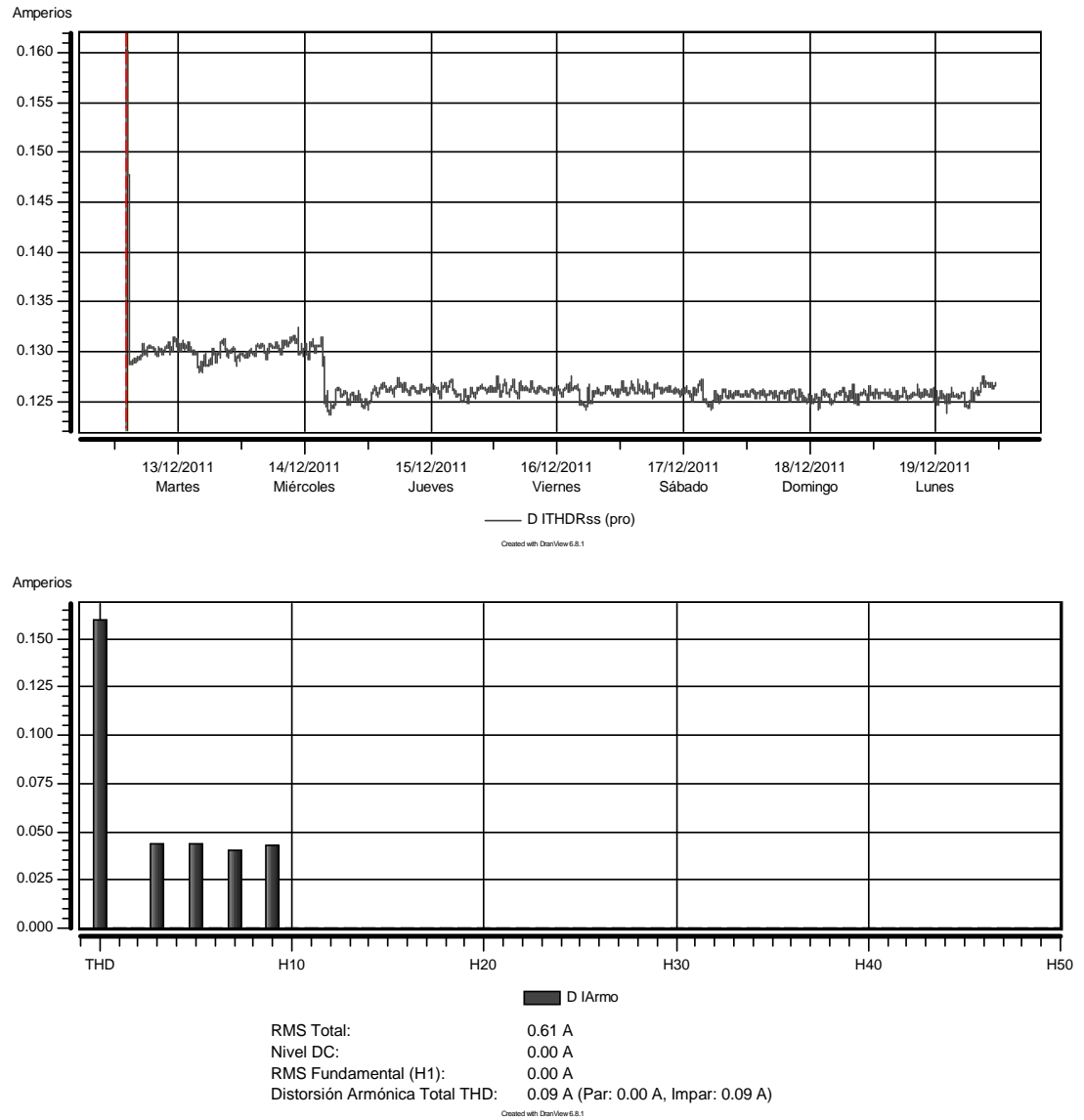
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Diagrama de fase D del armónico –tensión



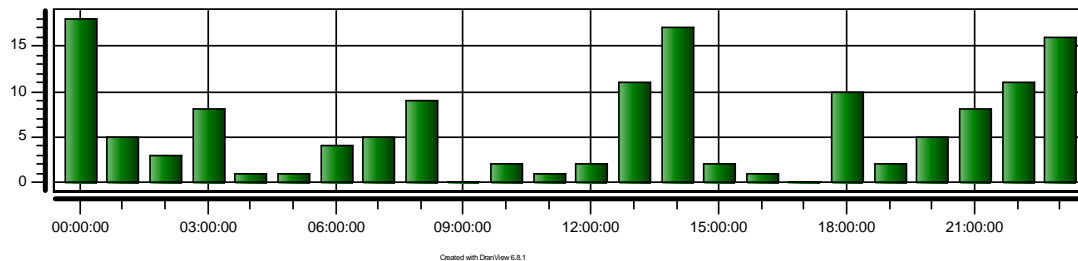
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Diagrama de fase D del armónico – intensidad



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Diagramas de actividad de transitorios de tensión**



Fuente: elaboración propia.

3.5. Interpretación de resultados

3.5.1. Voltaje

Analizando las gráficas obtenidas del equipo de medición de energía durante el período de muestreo, tal y como aparecen en las páginas anteriores, se puede concluir que:

El valor de voltaje del punto de alimentación es muy constante.

Existen variaciones, pero todas ellas dentro de los límites normales de operación.

El valor máximo de voltaje registrado durante el estudio fue de 423,3 V., el valor mínimo fue de 260,7 V y el valor promedio fue de 401,9 V.

En una ocasión el valor de voltaje estuvo fuera de los límites aceptables de ± 10 V del valor nominal.

3.5.2. Corriente

Analizando las gráficas obtenidas del equipo de medición de energía durante el período de muestreo, tal y como aparecen podemos concluir que:

El promedio de consumo de corriente para cada una de las tres líneas de la carga es de 737,4 A.

El consumo de corriente máximo para cada una de las tres líneas de la carga durante el periodo del análisis se mantiene frecuente en 957,7 A.

El consumo de corriente en este punto va de los 364,46 amperios a los 957,7 A trifásicos.

3.5.3. Desequilibrio

Esta medida de desequilibrio de voltaje se caracteriza por la existencia de asimetría en una de las tres fases de un sistema trifásico. Se debe, en general, a que el consumo está conectado fundamentalmente a una sola de las fases del sistema.

Analizando las gráficas obtenidas del equipo de medición de energía durante el período de muestreo, se puede concluir que:

- El voltaje, tal y como también vimos en las gráficas de voltaje mostradas anteriormente, es muy estable.
- El desequilibrio máximo durante el tiempo del estudio fue de 1,73 %.
- El desequilibrio promedio en la semana de observación fue de 0,32 %.

Se puede decir que el punto es muy confiable y estable ya que su desequilibrio de voltaje estuvo por debajo del 2 % durante más del 95 % del tiempo de muestreo.

3.5.4. Parpadeo

El parpadeo se caracteriza por una fluctuación del voltaje que ocasiona el centelleo de la iluminación visible por el ojo humano. Se debe, fundamentalmente, a la conexión y desconexión de consumos relevantes.

El parpadeo se describe por medio de dos parámetros: severidad del parpadeo de corta duración (gráfica anaranjada en este caso) PST y severidad del parpadeo de larga duración (gráfica azul en este caso) PLT.

Las normas definen que el PLT debe ser $\leq 0,65$ y el PST debe ser ≤ 1 .

Analizando las gráficas obtenidas del equipo de medición de energía durante el período de muestreo, tal y como aparecen en la página anterior, se puede concluir que:

- El valor del índice de severidad de parpadeo de corta duración PST sobrepasó el límite normado durante el tiempo del estudio. La medición fue de 5,5.
- El valor del índice de severidad de parpadeo de larga duración PLT sobrepasó el límite normado durante el tiempo del estudio. La medición fue de 2,4.

Se puede decir que el punto es muy confiable y estable ya que las ocasiones en que los límites fueron sobrepasados son mucho menores a una vez por hora, por lo que cumple la norma.

3.5.5. Frecuencia

Analizando las gráficas obtenidas del equipo de medición de energía durante el período de muestreo, se puede concluir que:

- La frecuencia eléctrica en la carga es muy constante.
- El máximo valor de frecuencia durante el período de registro fue de 60,46 Hz.
- El valor promedio de frecuencia estuvo alrededor de los 60 Hz.
- El valor mínimo de frecuencia durante el periodo de registro fue de 58,98 Hz.
- La frecuencia eléctrica, durante todo el curso del análisis, nunca estuvo fuera de los límites recomendados que son: límite superior 60,46 Hz, límite inferior 58,98 Hz.

Se puede decir que el punto es muy confiable y que cumple con la norma.

3.5.6. Porcentaje de distorsión armónica de voltaje

Analizando las gráficas obtenidas del equipo de medición de energía durante el período de muestreo, se puede concluir que:

- Para la fase 1 la medida máxima de la distorsión armónica total llegó a ser 4,00 %.
- Para la fase 2 la medida máxima de distorsión armónica total llegó a alcanzar el 4,13 %.
- Para la fase 3 el valor máximo de la distorsión armónica total fue de 3,97 %.

En general el punto en cuanto a armónicos cumple con las normas ya que ninguna de las fases llega al 5 % de distorsión armónica total.

3.5.7. Porcentaje de distorsión armónica de corriente

Analizando las gráficas obtenidas del equipo de medición de energía durante el período de muestreo, se puede concluir que:

En ninguna ocasión el valor de distorsión armónica sobrepasó el 20 %, se puede observar que la mayor distorsión armónica de corriente se dio para las tres fases.

- Para la fase 1 la medida máxima de la distorsión armónica total estuvo alrededor de 0,50 %.
- Para la fase 2 la medida máxima de distorsión armónica total estuvo alrededor de 0,48 %.
- Para la fase 3 el valor máximo de la distorsión armónica total estuvo alrededor de 0,46 %.

En general el punto en cuanto a armónicos cumple con las normas ya que ninguna de las fases llega al 20 % de distorsión armónica total.

4. EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN LA SUBESTACIÓN Y LA CARGA

4.1. Efectos generales

Existen cargas que son más susceptibles a los armónicos, principalmente los equipos con una entrada de forma de onda de voltaje sinusoidal.

Los armónicos pueden ser dañinos en el sistema, ya que pueden causar calentamiento en conductores o en dieléctricos, ocasionando de esta manera envejecimiento prematuro de los aislamientos eléctricos.

Es usual que los fabricantes establezcan los límites de funcionamiento de los equipos para tener una operación adecuada y una vida prolongada, pero cuando existen condiciones fuera de estos límites aceleran su envejecimiento o provocan falla.

Las corrientes armónicas, puede ocasionar problemas de distorsión, lo cual se refleja en la operación, sobrecalentamiento, falla prematura de equipos o disparo de interruptores.

La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas, puede percibirse considerando la reducción de la vida útil de los equipos por sobrecalentamiento producido por las corrientes armónicas y por los disparos de interruptores que generan paros innecesarios en plantas de producción.

4.2. Impacto en la vida de los equipos

Los fabricantes establecen los límites de funcionamiento de sus equipos por debajo de sus valores de falla para tener una operación adecuada y una vida prolongada; sin embargo, cuando existen condiciones de resonancia, dichos límites pueden ser excedidos, acelerando su envejecimiento o provocando su falla.

La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas, puede percibirse considerando lo siguiente:

- La sobre elevación de 10°C en la temperatura del aislamiento en conductores, reduce su vida a la mitad.
- Un incremento del 10 % en la tensión nominal del dieléctrico de un capacitor, reduce su vida a la mitad.

Estudios realizados sobre los efectos de la distorsión armónica, muestran reducciones de 20 % a 30 % en la vida de capacitores y de 10 % a 20 % en la vida de transformadores.

4.3. Efecto en los transformadores

En los transformadores el efecto que causan los armónicos es el incremento de pérdidas en el cobre y en el hierro, como consecuencia el envejecimiento y deterioro del mismo por el sobrecalentamiento producido por el incremento de las pérdidas.

El incremento de pérdidas depende de la frecuencia, por tanto, los componentes armónicos de alta frecuencia pueden ser más importantes que los componentes armónicos de baja frecuencia causando calentamiento en el transformador.

Las pérdidas que ocurren en el transformador causadas por la presencia de armónicos son las siguientes:

- Pérdidas proporcionales a la resistencia de los arrollamientos
- Pérdidas causadas por corrientes parásitas

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 o 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas I^2R , pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores u otras partes de hierro.

Las pérdidas sin carga o de núcleo son producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada senoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no senoidales. Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicas, estas son muy pequeñas

comparadas con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos.

Las pérdidas I^2R , si la corriente de carga contiene componentes armónicas, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto piel.

Están también, las pérdidas por corrientes de Eddy, estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no senoidal (y por lo tanto, también en su temperatura). Estas pérdidas se pueden expresar como:

$$P_e = P_{E,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2$$

Donde:

h = armónica

I_h = corriente de la armónica h , en amperes

I_R = corriente nominal, en amperes

P_e, R = pérdidas de Eddy a corriente y frecuencia nominal

Existen pérdidas adicionales que aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia como se muestra en la ecuación siguiente:

$$PAD = PAD, R \sum_{h=1}^{h=h \max} \left(\frac{I_H}{I_R} \right)^2 h$$

Donde:

PAD, R = pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal

Aunado a estas pérdidas, algunas cargas no lineales presentan un componente de corriente directa en la corriente de carga. Si este es el caso, este componente aumentará las pérdidas de núcleo ligeramente, pero incrementarán substancialmente la corriente de magnetización y el nivel de sonido audible, por lo que este tipo de cargas se debe evitar.

En el caso de transformadores conectados en delta - estrella (comúnmente de distribución) que suministran cargas no lineales monofásicas como pueden ser fuentes reguladas por conmutación, las armónicas “triplen” (múltiplos de 3) circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, pero no aparecerán en el lado de la delta (caso balanceado), ya que se quedan atrapadas en ésta produciendo sobrecalentamiento de los devanados.

Se debe tener especial cuidado al determinar la capacidad de corriente de estos transformadores bajo condiciones de carga no lineal puesto que es posible que los volts-amperes medidos en el lado primario sean menores que en el secundario.

Con el constante aumento de cargas no lineales, se han llevado a cabo estudios para disminuir la capacidad nominal de los transformadores ya instalados que suministran energía a este tipo de cargas.

Además, en el caso de transformadores que operarán bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador, utilizar un transformador con un factor K mayor a 1.

Estos transformadores son aprobados por UL (*Underwriter's Laboratory*) para su operación bajo condiciones de carga no senoidal, puesto que operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Entre las modificaciones con respecto a los transformadores normales están:

- El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas “triplen” circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.
- Se diseña el núcleo magnético con una menor densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado, y
- Utilizando conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.

El factor K se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma. La ecuación que lo define es:

$$\text{factor K} = \sum_{h=1}^{h=h \text{ max}} (I_H (PU))^2 h^2$$

Donde:

h = armónica

$I_h(\text{pu})$ = corriente armónica en p.u. tomando como base la corriente I_{rms} . Con el valor del factor K de la corriente de la carga, se puede escoger el transformador adecuado.

A continuación, se muestran los valores comerciales de transformadores con factor K [7].

Tabla III. **Valores comerciales de transformadores con factor K**

K	4
K	9
K	13
K	20
K	30
K	40

Fuente: elaboración propia.

4.4. Efecto en la carga

Algunos de los efectos nocivos producidos por el flujo de corrientes armónicas son:

- Aumento en las pérdidas por efecto Joule (I^2R).
- Sobrecalentamiento en conductores del neutro.
- Sobrecalentamiento en motores, generadores, transformadores y cables, reduciendo su vida.
- Vibración en motores y generadores.
- Falla de bancos de capacitores.
- Falla de transformadores.

- Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar incidentes eléctricos, mal funcionamiento y fallos destructivos, de equipos de potencia y control.
- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos sensibles.
- Interferencias en sistemas de telecomunicaciones.

Todos los equipos que tengan electrónica de potencia pueden tener un mal funcionamiento ante la presencia de distorsiones armónicas, ya que muchos de estos equipos para su correcto funcionamiento dependen de las señales del cruce por cero, y la distorsión armónica puede resultar en un cambio en el cruce por voltaje cero o en el punto al cual un voltaje fase a fase se vuelve mayor que otro voltaje fase a fase.

Los equipos electrónicos como computadoras, equipos que tengan en su interior controladores programables, en la mayoría de los casos requieren fuentes AC con un factor de distorsión de voltaje armónico menor al 5% con el mayor armónico solo siendo menor al 3 % del voltaje fundamental.

Como resultado de los altos niveles de armónicos se puede tener problemas en equipos electrónicos, estos problemas pueden ser leves y no afectar notablemente la funcionalidad de los equipos o pueden ser graves afectando su funcionalidad y tiempo de vida.

El ruido provocado por la presencia de armónicos, puede perjudicar las señales de radio y televisión, de igual manera equipo de video grabación pues estas señales pueden ser escuchadas o visualizadas en forma de ruido.

Por tanto, la vida útil de equipos electrónicos, en los cuales hay capacitores y transformadores se ve reducida por la presencia de los armónicos en el sistema eléctrico.

Analizando ahora el efecto sobre los capacitores, al tener cargas alimentadas con distorsión sobre corriente con cargas que consumen reactivos, la compensación del factor de potencia con bancos de capacitores puede ocasionar una resonancia paralelo excitada; lo que significa que se daría un aumento de la distorsión de manera elevada la cual podría provocar el disparo de los interruptores con protección termo magnética, o bien, abrir los fusibles que protegen los capacitores.

Cuando se colocan capacitores para compensar el factor de potencia de las cargas inductivas como motores, se corrige únicamente el factor de potencia de desplazamiento, no el de distorsión; esto provoca que el nivel de resonancia baje y el sistema pueda ser excitado por los armónicos producidos por las cargas no lineales. La combinación no lineal e inductiva representa la condición de resonancia paralelo la cual muestra distorsión elevada en los voltajes y sobre corrientes en los capacitores, por esta razón es que operan las protecciones.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a la información que brinda el fabricante del UPS *Masterguard*, se indica una distorsión armónica menor al 5 % para un UPS con rectificador de 12 pulsos.
2. Basado en las mediciones y análisis de calidad de energía en la entrada de alimentación del UPS tanto como en la salida de alimentación a la carga, puede determinarse que no existen armónicos que superen los límites establecidos por IEEE 519.
3. La distorsión total de voltaje VTHD en porcentaje para la entrada y salida del UPS no sobrepasa del 5 %.
4. La distorsión total de corriente ATHD en porcentaje para la entrada y salida del UPS no sobrepasa del 1 %.
5. El no tener presencia armónica que sobrepase los límites sugeridos por IEEE se puede considerar que no habrá reducción de vida útil de los equipos conectados a la red eléctrica y se reducirán las probabilidades de fallas en la coordinación de protecciones.
6. Se puede considerar que los resultados obtenidos de la carga armónica en este proyecto no estarían generando pérdidas adicionales a las especificadas por el fabricante del transformador de la subestación.

RECOMENDACIONES

1. Es vital considerar para la adquisición de un sistema de respaldo mediante UPS un equipo que incluya filtros de armónicos para evitar costos no calculados que pueden ser generados por disparo de interruptores, daños en transformadores, daño en la instalación eléctrica o equipos electrónicos.
2. Realizar estudios de calidad de energía en las instalaciones eléctricas periódicamente para determinar la presencia de armónicos en la red, que puedan sobrepasar los límites establecidos por IEEE y buscar la manera de reducirlos en el caso que se encuentren presente.
3. Considerando que el análisis de calidad de energía podría arrojar resultados indicando presencia de carga armónica, se recomienda realizar una revisión de los equipos de la subestación, cableados y equipo sensible a carga armónica para determinar su estado o requerimiento de mantenimiento o reemplazo de tal manera que se logré asegurar continuidad de servicio eléctrico en cargas críticas.
4. En instalaciones donde se tienen instalados bancos de capacitores donde se busca alcanzar la unidad en cuanto al factor de potencia, se recomienda verificar que no existan cargas no lineales mayores al 10% con relación a la carga total ya que la distorsión armónica podría aumentar, ya que los capacitores pueden provocar resonancias paralelas en el rango de la 3ª y la 19ª armónica.

BIBLIOGRAFÍA

1. CARNOVALE, Daniel. Application of IEEE Std 519-1992 Harmonic Limits.
2. GONZÁLEZ LÓPEZ, Francisco Javier. *Fundamentos teóricos sobre Armónicas*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala 1,999, 253 p.
3. GONZALEZ, Danny. *Como afectan las armónicas a un sistema eléctrico y sus equipos*. [en línea] www.qes-sac.com México. [consulta: marzo, 2016].
4. IEEE *Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems*. IEEE Estándar 519-2014. IEEE, 2014.
5. IEEE *Recommended practice for monitoring electric power Quality*. IEEE Estándar 519-2009. USA: IEEE, 2009.
6. LEMIEUX, Guy. "Power System Harmonic Resonance". IEEE Transactions on Industry Applications, USA 1990, Núm. 3, 483-488p.
7. PHIPPS, James. NELSON, John. SEN, Pankaj. *Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, Núm. 2, 30 p.
8. TEJADA, Alexis. Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos. www.mty.itesm.mx México. Octubre 2013.

9. VALKENBURG, Van. *Análisis de Redes*. 9ª. ed. México: Limusa.1996.
635 p.